



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY VYBRANÉ SOUČÁSTI V  
SYSTÉMU REGULACE PARNÍ TURBÍNY**

PROPOSAL OF TECHNOLOGY A SELECTED COMPONENT IN THE CONTROL SYSTEM OF STEAM  
TURBINE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Roman Hradil**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Josef Chladil, CSc.**

**BRNO 2017**

## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Roman Hradil**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Chladil, CSc.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### Návrh technologie výroby vybrané součásti v systému regulace parní turbíny

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie obrábění na CNC strojích, řezné nástroje a jejich aplikace, technologie vybrané součástky, návrh nové technologie, zhodnocení.

#### Cíle diplomové práce:

Návrh technologie obrábění na CNC stroji.

#### Seznam literatury:

FOREJT, M., PÍŠKA, M. (2006): Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

PÍŠKA, M. et al. (2009): Speciální technologie obrábění. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

ZEMČÍK, O. (2002): Technologická příprava výroby. Brno: CERM, 158 s. ISBN 80-214-2219-x.

MELUZÍN, T., MELUZÍN, V. (2007): Základy ekonomiky podniku. Vyd. 2., Brno: Akademické nakladatelství CERM, 119 s. ISBN 978-80-214-3472-1.


HUMÁR, A. (2008): Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing, s.r.o., 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

SHAW, M. C. (2005): Metal Cutting Principles, 2nd. edition, New York Oxford University Press, 651 p., ISBN 0-19-514206-3.

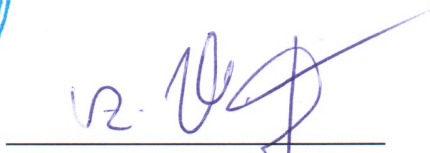
Mc. MAHON, C.; BROWNE, J. (1998): CAD / CAM Principles, Practice and Manufacturing Management, 2nd. edition, Addison - Wesley, 665 p. ISBN 02-011-7819-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 9. 11. 2016



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

**ABSTRAKT**

Předmětem diplomové práce je návrh technologie výroby hydraulického válce - části servomotoru regulačního ventilu parní turbíny. Předpokladem je perspektivní technologie výroby daného dílce na jednom pracovišti za použití CAM systému Siemens NX10. Realizace této práce probíhala ve spolupráci s firmou Siemens, s.r.o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery v Brně. Součástí práce je stručný úvod do problematiky parních turbín. Hlavní část je věnována rozboru vybrané součásti z hlediska technologičnosti, návrhu nejvýhodnější strategie technologie výroby a její realizace. Závěr se zabývá technicko-ekonomickým posouzením návrhu.

**Klíčová slova**

technologie výroby, technologičnost, třískové obrábění, hydraulický válec, Siemens NX10

**ABSTRACT**

The subject of this thesis is the design of production technology of the hydraulic cylinder – the part of servomotor of a steam turbine control valve. The main precondition is a perspective technology of manufacturing the component on a single workplace using Siemens NX10 CAM system. The implementation of this work was carried out in cooperation with the Siemen, s.r.o., the branch of Industrial Turbomachinery in Brno. Part of the thesis is a brief introduction to the issue of steam turbines. The main part is devoted to analysis of a selected component in terms of technology, design of the best strategy of production technology and its implementation. The conclusion deals with the technical and economic assessment of the proposal.

**Key words**

production technology, technology, chip machining, hydraulic cylinder, Siemens NX10

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HRADIL, R. *Návrh technologie výroby vybrané součásti v systému regulace parní turbíny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 65 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef CHLADIL, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh technologie výroby vybrané součásti v systému regulace parní turbíny** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Roman Hradil

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Josefu Chladilovi, CSc. z VUT v Brně, za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Děkuji Ing. Martinu Bařákovi ze společnosti Siemens, s.r.o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery, za poskytnutou příležitost k vypracování diplomové práce a cenné rady a připomínky.

V neposlední řadě děkuji přítelkyni a rodině za neomezenou podporu a motivaci při studiu.

## OBSAH

|   |    |
|---|----|
| ABSTRAKT .....  | 4  |
| PROHLÁŠENÍ.....   | 6  |
| PODĚKOVÁNÍ .....  | 7  |
| OBSAH.....  | 8  |
| ÚVOD.....   | 10 |
| 1 PARNÍ TURBÍNA.....  | 11 |
| 2 ROZBOR SOUČÁSTI.....  | 14 |
| 2.1 Funkce .....  | 14 |
| 2.2 Technologičnost .....                                     | 15 |
| 2.3 Materiál .....  | 15 |
| 2.3.1 Měrná řezná síla.....                                   | 16 |
| 2.3.2 Obrobitelnost .....                                     | 16 |
| 2.4 Konstrukce, předepsaná přesnost a struktura povrchu ..... | 17 |
| 3 NÁVRH ŘEŠENÍ TECHNOLOGIE .....                              | 18 |
| 3.1 Metodika vyhodnocení.....                                 | 18 |
| 3.2 Volba polotovaru.....                                     | 19 |
| 3.3 Volba stroje .....  | 20 |
| 3.3.1 Kontrolní výpočty pro frézovací operace .....           | 22 |
| 3.3.2 Kontrolní výpočty pro vrtací operace .....              | 25 |
| 3.3.3 Kontrolní výpočty pro soustružnické operace .....       | 27 |
| 3.4 Náklady na polotovar .....                                | 29 |
| 3.5 Náklady na strojní čas hrubování.....                     | 29 |
| 3.6 Návrh řešení opracování vnitřního tvaru.....              | 32 |
| 3.6.1 Soustružení.....  | 32 |
| 3.6.2 Frézování a vyvrtávání.....                             | 35 |
| 3.7 Varianta 1 - 3: výkovek kruhového průřezu .....           | 37 |
| 3.8 Varianta 4 - 6: výkovek čtvercového průřezu .....         | 38 |
| 3.9 Porovnání variant, vyhodnocení.....                       | 39 |
| 4 ZVOLENÁ STRATEGIE.....                                      | 41 |
| 4.1 Technologický postup .....                                | 41 |
| 4.2 Upínání.....  | 42 |
| 4.2.1 Výpočet upínací síly v 1. ustavení .....                | 42 |
| 4.2.2 Výpočet upínací síly v 2. ustavení .....                | 43 |
| 4.3 Nástroje .....  | 44 |



|     |   |    |
|-----|---|----|
| 5   | TVORBA NC PROGRAMU .....                          | 49 |
| 5.1 | Prostředí NX10.....                               | 49 |
| 5.2 | Kontrola 3D geometrie.....                        | 50 |
| 5.3 | Nastavení prostředí obrábění.....                 | 50 |
| 5.4 | První upnutí.....                                 | 51 |
| 5.5 | Druhé upnutí.....                                 | 53 |
| 5.6 | Ukázka NC kódu .....                              | 55 |
| 6   | EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ NAVRŽENÉ TECHNOLOGIE ..... | 56 |
| 7   | TECHNICKO-EKONOMICKÉ POSOUZENÍ.....               | 59 |
|     | DISKUZE .....                                     | 60 |
|     | ZÁVĚR .....                                       | 61 |
|     | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....                     | 62 |
|     | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....          | 63 |

## ÚVOD

Úspěch výrobního podniku je funkcí mnoha proměnných. Ne všechny výrobní podniky sledují stejné proměnné a ne každý výrobní podnik vyřeší rovnici úspěchu. Bez ohledu na jejich zaměření a hlubší pohled je totiž zpravidla v rovnosti úspěšná firma a její konkurenceschopná produkce, zpravidla také konkurenceschopnost a cena především.

Ve zcela zjednodušeném modelu je úkolem mnohých podniků navrhnout, vyrobit, nalézt uplatnění na trhu, se ziskem prodat a dále vyvíjet produkt, který splňuje tento nezbytný předpoklad. V celém výrobním procesu jsou zapojeny oddělení konstrukce, **technologie a výroby**, oddělení obchodu a řízení zakázek, výzkumu, vývoje apod.

Oddělení technologie výroby si klade za cíl nalézt hospodárnou a efektivní cestu výroby součástí, tj. cestu nejnižší pracnosti a výrobních nákladů při dodržení vstupních podmínek (zachování funkčnosti, spolehlivosti a životnosti součástí). Je současně zpětnou vazbou ostatním oddělením, především konstrukci. Návrh technologie výroby a tvorba technologického postupu zahrnuje mj. volbu výchozího polotovaru, výrobních prostředků, pořadí a počtu operací, při kterých se mění tvar, rozměry, jakost a vlastnosti součástí - tzn. rozsáhlou tvůrčí a odbornou práci, u které snížit pracnost a výrobní náklady znamená nalézt jednodušší a levnější způsoby, hledat jiná, lepší řešení a tyto analyzovat, realizovat a optimalizovat (maximalizovat produktivitu). Takto vložená přidaná hodnota napomáhá k udržení perspektivy podniku ve smyslu vytvoření nebo zachování a rozvíjení náskoku před konkurencí a podporuje schopnost generovat zisk.

Ve specifickém případě výroby parních turbín, respektive instalace celého turbosoustrojí, zcela specifickém prostředí a specializovaném zaměření na trhu, který lze charakterizovat nabídkou převyšující poptávku, je prodejní cena zásadní. Od podpisu smlouvy se zákazníkem, přes vývoj, konstrukci, plánování a výrobu až po expedici a montáž, zde vstupuje ohromné množství faktorů s přímým vlivem na konkurenceschopnost výrobce. Z výše uvedeného možná nepřímo vyplývá pozornost, kterou je třeba věnovat každé jednotlivé části řetězce a důraz, který je třeba klást na efektivnost její výroby, ačkoliv vliv jejího podílu v měřítku celého objemu výroby nemusí být na první pohled patrný.

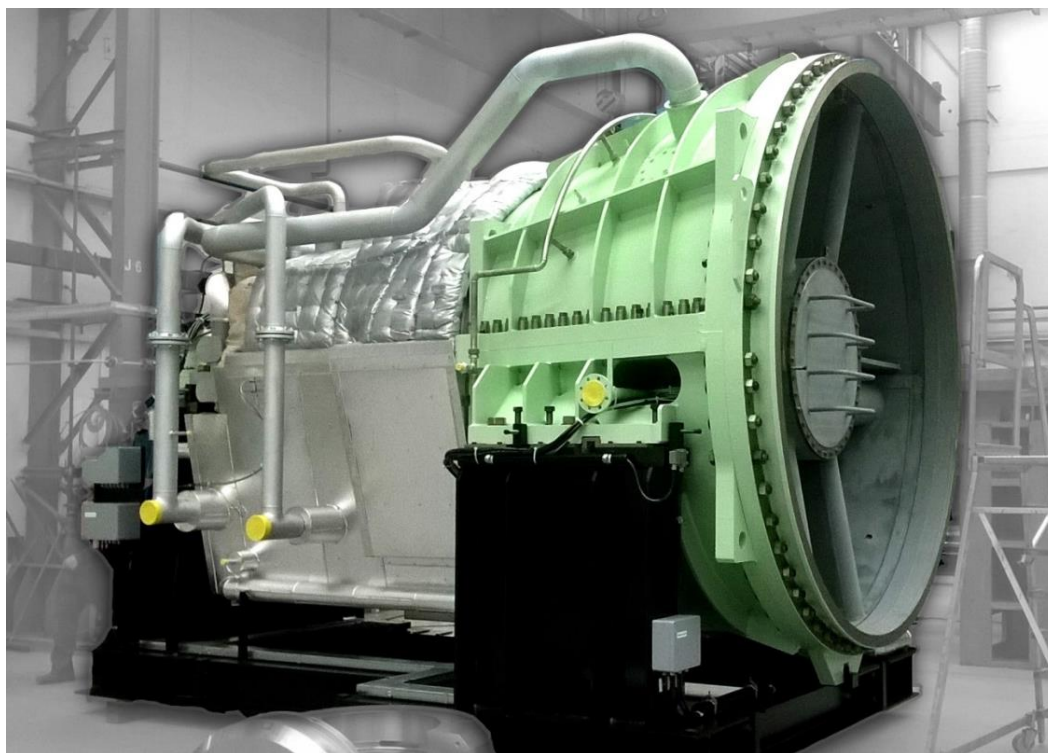
Tento projekt se zabývá výrobou hydraulického válce servomotoru, zapojeného v regulaci parní turbíny. Bude proveden rozbor součástí z hlediska její technologičnosti, volby výchozího polotovaru a výrobních možností. Podnětem pro tuto studii byl nákup nového obráběcího centra, kterým se mění celý pohled i charakter výroby. Snahou je proto směřovat výrobu na jedno pracoviště pro zajištění nejnižší pracnosti. Dojde k analýze volby výchozího polotovaru, návrhu variant řešení technologického postupu, volbě nejvýhodnější strategie a experimentálnímu ověření. Racionální předpoklad úspory nákladů vede v části technicko-ekonomického posouzení ke zhodnocení efektu navrženého řešení v porovnání s již zavedenou technologií pouze okrajově.

## 1 PARNÍ TURBÍNA

Parní turbína (obr. 1) představuje technický vynález, jehož význam je patrný ze stále se zvyšující poptávky po elektrické energii. Dalo by se říci, že jako další vývojový stupeň mj. svou účinností a dosahovaným výkonem překonal a proto i vytlačil na okraj technického zájmu parní stroj. Ve většině případů je parní turbína využívána jako pohon elektrických generátorů za účelem výroby elektrické energie a tepla ve spalovnách, teplárnách a elektrárnách na fosilní i jaderné palivo. Společná výroba obou těchto produktů je známa pod pojmem kogenerace. Moderní způsob výroby elektrické energie a tepla využívá paroplynového cyklu, který vyšší tepelné účinnosti dosahuje využitím odpadního tepla palin spalovací turbíny. Parní turbína nachází široké uplatnění také v mnoha technologických provozech a odvětvích průmyslu (s odběrem tzv. průmyslové páry za jiným, než posledním stupněm), jako jsou například cukrovary, papírny, chemické provozy apod., dále jako pohon turbokompresorů, čerpadel, lodí, apod. [1,2,3].

Mezi významné výrobce parních turbín nejen v České republice patří Siemens, s.r.o., odštěpný závod Industrial Turbomachinery v Brně (*dříve Alstom Power, ABB Alstom Power, ABB Energetické systémy, ABB První brněnská strojírna Brno, První brněnská strojírna Brno, Erste Brünner Maschinen-Fabriks-Gessellschaft*) [2].

Parní turbíny slouží, jako hnací zařízení – motory. Jsou to lopátkové točivé tepelné stroje, sestávající převážně z několika za sebou řazených stupňů – soustava rozváděcích (statorových) a sousedních oběžných (rotorových) lopatek tvoří jeden pracovní stupeň. Účelem parní turbíny je zpracování převážně vodní páry a transformace její energie využitím expanze v zakřivených mezilopátkových prostorech jednotlivých stupňů. Energie páry je přenášena na oběžné lopatky rotoru, a tak se odvádí jako krouticí moment (přeměna tepelné energie v mechanickou) [1,2,3].

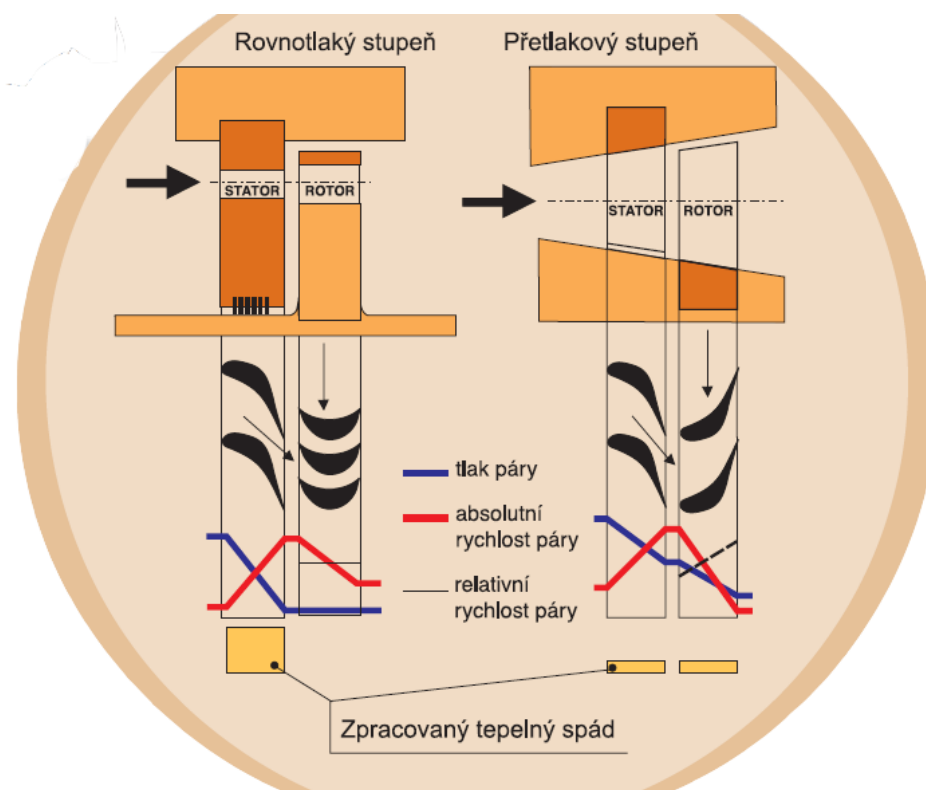


Obr. 1 Parní turbína.

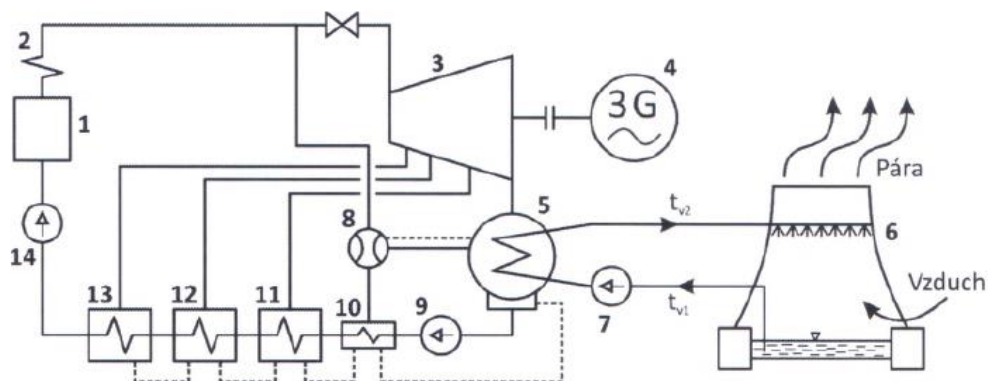
Na obr. 3 až obr. 5 jsou znázorněna základní schémata zařízení s kondenzační a protitlakovou turbínou (resp. kondenzační s jedním odběrem páry). Voda je čerpadlem dopravována do kotle, kde se vypařuje a zároveň ohřívá na požadovanou teplotu. Přes regulaci pára vstupuje do turbíny, kde dochází k expanzi přehřáté páry a přeměně tepelné energie na mechanickou energii. Pára v rozváděcích lopatkách expanduje vlivem snižování tlaku za současného zvyšování svoji rychlosti. Vlivem zakřivení oběžných lopatek mění svůj směr a působí na ně určitou silou, čímž vzniká moment, který uvádí rotor do otáčivého pohybu. Takto generovaná mechanická energie je obvykle přeměněna v elektrickou energii (turbína společně s generátorem tvoří tzv. turbogenerátor). Pára za posledním stupněm je následně odváděna do technologie u protitlakových turbín (tlak páry je za posledním stupněm větší, než atmosférický) nebo do kondenzátoru u kondenzačních turbín (tlak páry je za posledním stupněm menší, než atmosférický) [1,4].

Turbíny se podle typu pracovních stupňů (rozdílů tlaků před a za oběžnou řadou lopatek) dělí na rovnotlakové (akční) a přetlakové (reakční) – obr. 2. U rovnotlakového stupně dochází k expanzi páry v rozváděcím ústrojí (počáteční tlak páry  $p_0$  se v rozváděcích kanálech sníží na  $p_1$ ), pára dále vstupuje pod vhodným úhlem do oběžných lopatek, kde však již neexpanduje – tlak před oběžným kolem a za ním je stejný. U přetlakového stupně expanduje pára nejen v rozváděcích kanálech, ale také v kanálech oběžných lopatek, tzn., že při výstupu z oběžných lopatek má nižší tlak, než při vstupu do nich [1,4].

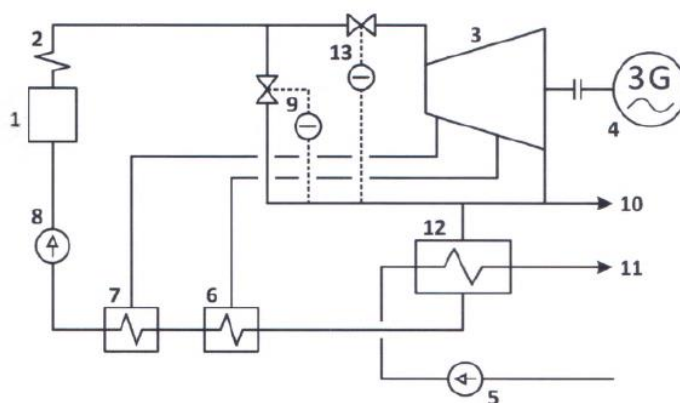
Parní turbíny je, alespoň dle základních poznávacích znaků, možné rozdělit podle výkonu, počtu těles, směru průtoku páry, počtu stupňů, způsobu upevnění apod.



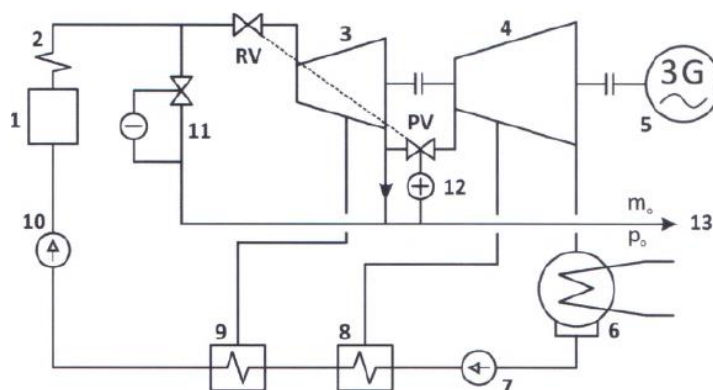
Obr. 2 Pracovní stupně turbíny [2].



Obr. 3 Schéma kondenzační turbíny [4]: 1) kotel, 2) přehřívák páry, 3) turbína, 4) el. generátor, 5) kondenzátor, 6) chladicí věž, 7) čerpadlo chladicí vody, 8) vývěva, 9) kondenzační čerpadlo, 10) až 13) ohříváky napájecí vody, 14) napájecí čerpadlo.



Obr. 4 Schéma protitlaké turbíny [4]: 1) kotel, 2) přehřívák páry, 3) turbína, 4) el. generátor, 5) oběhové čerpadlo, 6) a 7) ohříváky napájecí vody, 8) napájecí čerpadlo, 9) redukční stanice, 10) odběr protitlaké páry, 11) výstup síťové vody, 12) ohřívák síťové vody, 13) tlakový regulátor.



Obr. 5 Schéma odběrové turbíny [4]: 1) kotel, 2) přehřívák páry, 3) vysokotlaký (VT) díl turbíny, 4) nízkotlaký (NT) díl turbíny, 5) el. generátor, 6) kondenzátor, 7) čerpadlo, 8) a 9) ohříváky napájecí vody, 10) napájecí čerpadlo, 11) redukční stanice, 12) přepouštěcí ventil, 13) regulovaný odběr.

## 2 ROZBOR SOUČÁSTI

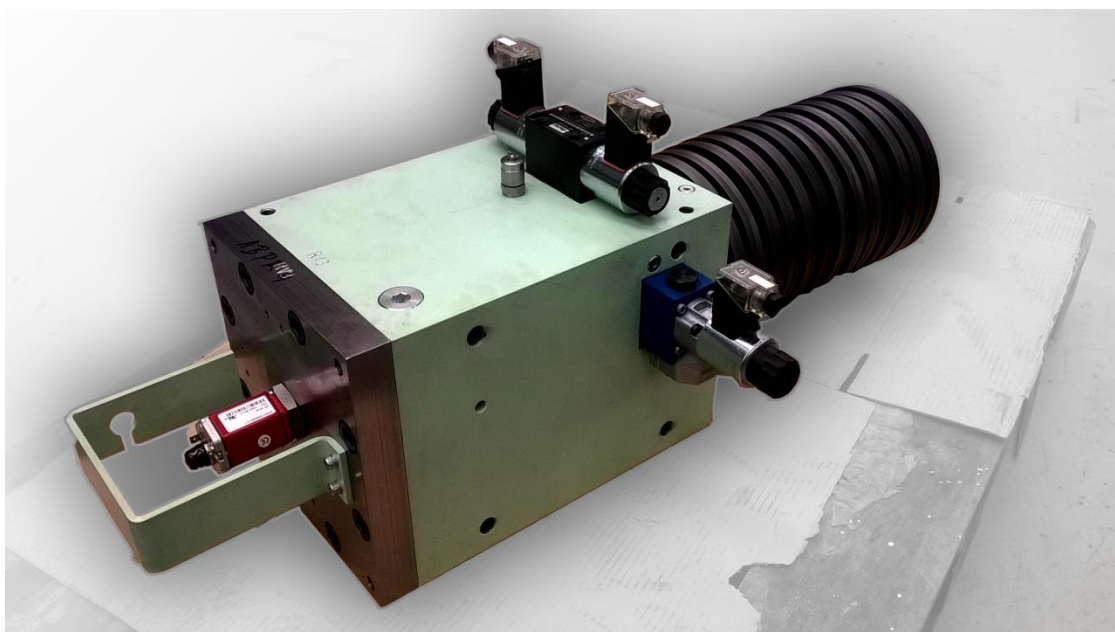
Nezbytným krokem pro dodání technologických podkladů (výrobní dokumentace a NC programu) k výrobě zadané součásti při respektování požadavků na efektivitu a hospodárnost výroby (maximálního využití potenciálu dostupných prostředků), je podrobný rozbor dat o vstupním materiálu, požadovaném množství a kvalitě, příp. termínech a rozpočtu (posouzení výrobních možností), které přímo ovlivňují volbu nejvýhodnější strategie. Technolog se tak setkává s pojmy, jako je vyrobiteľnosť, technologičnosť, obrobitelnosť, tedy pojmy, které se podílí na posouzení míry schopnosti součást vyrobit (posouzení vlivů na tuto schopnost) [15].

Mezi významné vlivy mj. patří [15]:

- vlastnosti vstupního materiálu (stav polotovaru a jeho povrchu, tepelné zpracování, mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti, chemické složení, rozměry, tvarová složitost, požadované stupně přesnosti, tolerance rozměrů a tvarů apod.),
- charakter obráběcího procesu (charakter řezu, řezné podmínky, řezné síly, a výkony, tuhost soustavy, apod.),
- úroveň vybavení (produktivita nástrojů, jejich trvanlivost a životnost, kinematika stroje a jeho možnosti – výkon a otáčky vřetene, možnosti chlazení apod.),
- úroveň technologické (počítačové) podpory výroby, možnosti automatizace, investiční možnosti apod.

### 2.1 Funkce

Řešená součást plní funkci hydraulického válce servomotoru (obr. 6) regulačního ventilu parní turbíny. Na základě signálů z čidel regulovaných veličin realizuje požadované funkce regulace prostřednictvím výstupních signálů. Vstupnímu signálu do elektrohydraulického převodníku odpovídá úměrný výstupní tlak laděného oleje, jemuž je úměrný zdvih příslušného servomotoru regulačních ventilů. Uvnitř válce je píst, jehož poloha je ovládána tlakovým olejem a pružinou a ovlivňuje průtok páry na vstupu do turbíny [5].



Obr. 6 Sestava servomotoru.



## 2.2 Technologičnost

Technologičnost konstrukce výrobku lze vnímat jako souhrnný vliv mnoha faktorů ovlivňující proces výroby a její pracnost. Významný vliv na tuto vlastnost výrobku má konstrukční příprava výroby – zkušenost konstruktéra, který na součástku klade objektivní podmínky nejen z funkčního, ale také technologického hlediska (opodstatněné nároky na jakost materiálu, tvarovou složitost výrobku, požadovanou přesnost rozměrů apod.). Vlastnosti výrobku (celková koncepce, ale i koncepce jednotlivých částí) by měly respektovat jak konstrukci (jednoduchost a účelnost konstrukce), tak přijatelnou ekonomiku výroby [6].

Vliv na technologičnost má tedy mj. [6]:

- volba výchozího materiálu a návrh polotovaru,
- návrh rozměrů a tvaru součástí,
- požadovaná přesnost a struktura povrchu,
- celková koncepce výrobku,
- výrobní zařízení a možnosti, organizace výroby.

## 2.3 Materiál

Výchozím materiálem je výkovek z nízkolegované oceli ČSN 41 5320 zařazené do skupiny ocelí pro vyšší teploty a žárovevné oceli pro velké výkovky. Ekvivalentem v označení zahraničních norem je W. Nr. ~ 1.7709, EN (EN ISO) 21CrMoV5-7. Vybrané vlastnosti jsou uvedeny v tab. 1, chemické složení v tab. 2 [7].

Dle standardu ISO je materiál svou obrobitelností zařazen do skupiny ISO P. Na obr. 7 je zobrazeno zařazení do materiálové skupiny firmy Sandvik. Důležitá je hodnota měrné řezné síly  $k_{c1} = 1\,950\text{ MPa}$  a exponentu  $m_c = 0,25$ .

Tab. 1 Vlastnosti oceli ČSN 41 5320 [7].

|  |       |           |
|--|-------|-----------|
| Mez kluzu $R_e$ nebo $R_{p0,2}$ min            | [MPa] | 560       |
| Mez pevnosti v tahu $R_m$                      | [MPa] | 690 - 880 |
| Modul pružnosti v tahu $E$                     | [GPa] | 206       |
| Obrobitelnost – frézování, soustružení, vrtání | [-]   | 12b       |

Tab. 2 Chemické složení v hm. % oceli ČSN 41 5320 [7].

| C            | Mn           | Si           | Cr           | Mo           | V            | P          | S          |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|
| 0,20 až 0,28 | 0,50 až 0,80 | 0,17 až 0,37 | 1,10 až 1,40 | 0,55 až 0,75 | 0,15 až 0,30 | max. 0,035 | max. 0,035 |

| MC kód    | Materiálová skupina | Materiálová podskupina                     | Způsob výroby                        | Tepelné zpracování | nom.   | Měrná řezná síla, $k_{c1}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $m_c$ |
|-----------|---------------------|--|--------------------------------------|--------------------|--------|---|-------|
| P2.1.Z.AN | 2                   | 1 $\leq 0,25\% \text{ C}$                  | Z                                    | AN                 | 175 HB | 1700  | 0.25  |
| P2.2.Z.AN | 2                   | 2 $>0,25\% \dots \leq 0,55\% \text{ C}$    | Z kované/válcované/tažené za studena | AN žíhané          | 240 HB | 1950  | 0.25  |
| P2.3.Z.AN | 2                   | 3 vysoký obsah uhlíku, $>0,55\% \text{ C}$ | Z                                    | AN                 | 260 HB | 2020  | 0.25  |
| P2.4.Z.AN | 2                   | 4 automatová ocel                          | Z                                    | AN                 | 225 HB |   |       |

Obr. 7 Zařazení obráběné oceli do materiálové skupiny firmy Sandvik [10].

### 2.3.1 Měrná řezná síla

Je důležitou charakteristikou obráběného materiálu, kterou lze definovat, jako sílu potřebnou k překonání soudržnosti materiálu účinkem řezného procesu (síla ve směru hlavního řezného pohybu vztažená na průřez třísky  $1 \text{ mm}^2$ ) a je dána vztahem (2.1).

Výpočet měrné řezné síly [8]: (2.1)

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} [\text{MPa}]$$

nebo [8]: (2.2)

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_D^{m_c}} [\text{MPa}]$$

kde:  $F_c$  [N] řezná síla,  
 $A_D$  [ $\text{mm}^2$ ] průřez třísky,  
 $k_{c1}$  [MPa] měrná řezná síla konkrétního materiálu,  
 $h_D$  [mm] tloušťka třísky,  
 $m_c$  [-] exponent závislý na vlastnostech materiálu.

Velikost měrné řezné síly ovlivňují [8]:

- fyzikální vlastnosti materiálu obrobku (zejména tvrdost nebo pevnost),
- velikost průřezu třísky – zejména tloušťka třísky,
- geometrie nástroje, případně další deformační podmínky,
- řezné prostředí, apod.

### 2.3.2 Obrobitelnost

Je důležitou technologickou vlastností obráběného materiálu, která významně ovlivňuje technologický a ekonomický efekt obráběcího procesu. Lze ji definovat jako míru schopnosti daného materiálu být zpracován některou z metod obrábění a jako souhrnný vliv fyzikálních vlastností a chemického složení materiálu na průběh a ekonomické i kvalitativní výsledky procesu obrábění. Závisí však i na zvoleném způsobu obrábění tepelném zpracování a způsobu výroby polotovaru, řezných podmínkách, prostředí, na geometrii bříty řezného nástroje a jeho materiálu [9, 16].

ČSN 41 5320 udává obrobitelnost **12b** (etalon - ocel 12 050.1 - 14b). Tab. 3 přiřazuje jednotlivým prvkům jejich vliv na obrobitelnost.

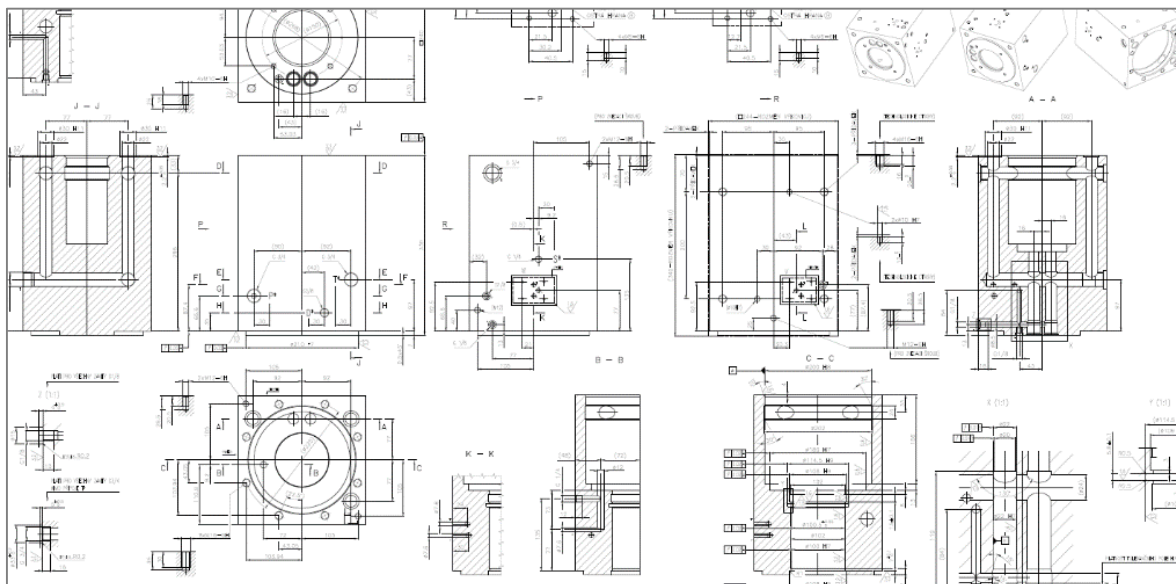
Tab. 3 Vliv jednotlivých prvků na obrobitelnost [9].

|              |  |
|--------------|--|
| C            | Má vliv na tvrdost (s rostoucím obsahem se zvyšuje opotřebení otěrem).   |
| Mn           | Tvoří měkké sulfidy s lubrikační schopností. Vysoký obsah síry zlepšuje obrobitelnost a dělení třísek.   |
| Si           | Tvoří oxidické vměstky, které zvyšují rychlost opotřebení otěrem.  |
| Cr, Mo, V, P | Zvyšuje opotřebení otěrem.   |
| S            | Má velmi příznivý vliv na obrobitelnost. Již velmi malé odchylky v koncentraci, například již mezi 0,01 % a 0,03 %, mohou mít zásadní vliv na obrobitelnost. |

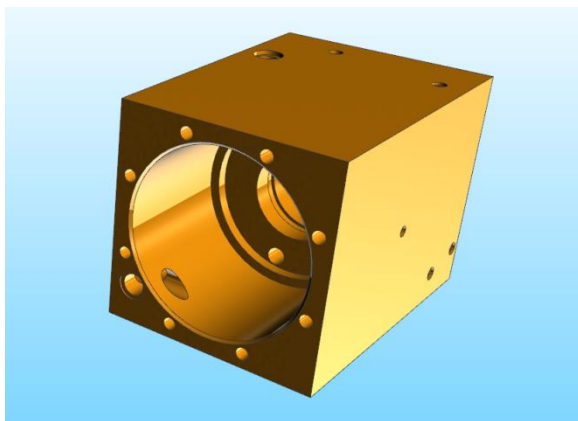


## 2.4 Konstrukce, předepsaná přesnost a struktura povrchu

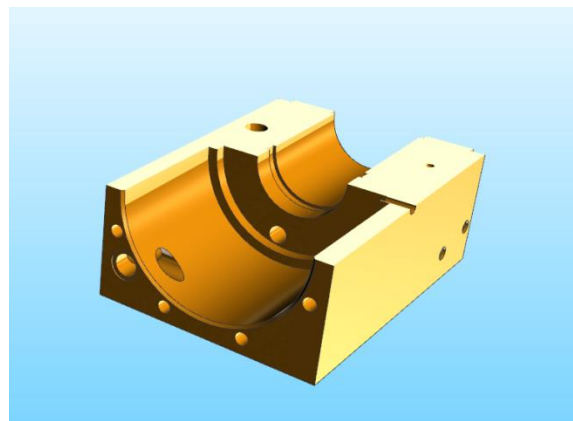
Vnější tvar a rozměry 240 x 240 x 336 mm umožňují uchycení válce na rám turbíny, připojení řídicích prvků a rozváděcích hadic. Z funkce plyne význam zejména vnitřního tvaru (skupina vnitřních otvorů), propojovacích otvorů a děr pro pohyb šoupátka. Některé funkční prvky mají ve výkresové dokumentaci předepsané tolerance tvaru a polohy a zvýšené požadavky na rozměrovou přesnost a kvalitu opracování. Vnitřní průměr  $\varnothing 200H8$  mm ( $Ra\ 1,6\ \mu m$ ) zajišťuje vzájemnou interakci s pístem a je zároveň základnou A, ke které se svou polohou váží ostatní průměry (tolerance kruhového obvodového házení 0,1 mm, třída přesnosti IT8, a IT9). Podobně díra  $\varnothing 22H8$  mm ( $Ra\ 1,6\ \mu m$ ) je základnou B (interakce se šoupátkem), ke které jsou svou polohou vázány průměry  $\varnothing 24H8$  mm,  $\varnothing 28$  mm,  $\varnothing 20$  mm (tolerance kruhového obvodového házení rovněž 0,1 mm, IT8 a IT9). Ostatní rozměry a prvky nevyžadují zvýšenou pozornost z pohledu volby obráběcích metod, většina podléhá normě ISO 2768-mK o netolerovaných rozměrech, požadavek na drsnost povrchu  $Ra\ 3,6\ \mu m$ , příp.  $Ra\ 6,3\ \mu m$ . Čitelnost výkresové dokumentace (obr. 8) je záměrně omezena. Válec je zobrazen na obr. 9, řez válcem na obr. 10.



Obr. 8 Náhled výkresu součásti.



Obr. 9 Hydraulický válec.



Obr. 10 Řez hydraulickým válcem.

### 3 NÁVRH ŘEŠENÍ TECHNOLOGIE

Nejvyšší produktivity výroby lze docílit pouze návrhem optimálního toku materiálu a efektivního způsobu jeho zpracování. Vysoký tlak na cenu výrobku v důsledku znamená zajistit nejnižší spotřebu materiálu (rozměry a tvar polotovaru by měly být co nejbližší rozměrům a tvaru hotové součásti), minimální spotřebu práce (nejkratší manipulační, přípravné a strojní časy) a nízkou míru investic při současném zvyšování technologické úrovně (vše za účelem pozitivního dopadu na výrobní náklady). Jedním z perspektivních opatření je redukce počtu potřebných výrobních prostředků slučováním výrobních operací ze specializovaných pracovišť (jednouúčelové stroje) na pracoviště univerzální (obráběcí centra) a nasazení vysoce produktivních nástrojů s ohledem na přijatelnou ekonomiku procesu a investiční limit. Z uvedeného plyne pozornost, kterou je třeba věnovat volbě výchozího polotovaru, volbě strojů a vybavení, automatizaci a vývoji.

#### 3.1 Metodika vyhodnocení

Uspokojivý výsledek vyhodnocení potenciálně přijatelných výrobních postupů je závislý na volbě vhodné porovnávací a vyhodnocovací metody. Jelikož zpravidla nebývá dostatek prostoru ke stanovení obráběcích časů pomocí CAM softwaru (zpracování NC programu pro každou poptávku), je třeba zvolit jiný spolehlivý nástroj – standardní numerické metody, anebo geometrický model, který strojní čas vypočte z parametrů jednotlivých technologických prvků na součástce. Součástka je rozdělena na technologické prvky, které jsou charakterizovány způsobem opracování (rovinné plochy – frézování, díry se závity – vrtání a řezání závitu, apod.) a objemy, které je třeba odebrat. Podle navržených nástrojů a řezných podmínek je vypočtena výkonnost nástroje (objem odebraného materiálu v čase) a díky tomu strojní čas jednotlivých úseků. Doplnění databáze již používaných (nebo uvažovaných) nástrojů o parametry výkonnosti obrábění je velice užitečné pro kalkulaci nákladů na obrábění.

Řezné podmínky jsou v tomto kroku voleny zpravidla na spodní hranici rozsahů doporučení výrobce (tzv. startovací parametry), a to mj. z důvodu zajištění dostatečné časové rezervy a prostoru pro následnou optimalizaci obráběcího procesu (tlak na cenu způsobuje zpravidla jednosměrnou cestu úprav výrobních časů - a to zkracování).

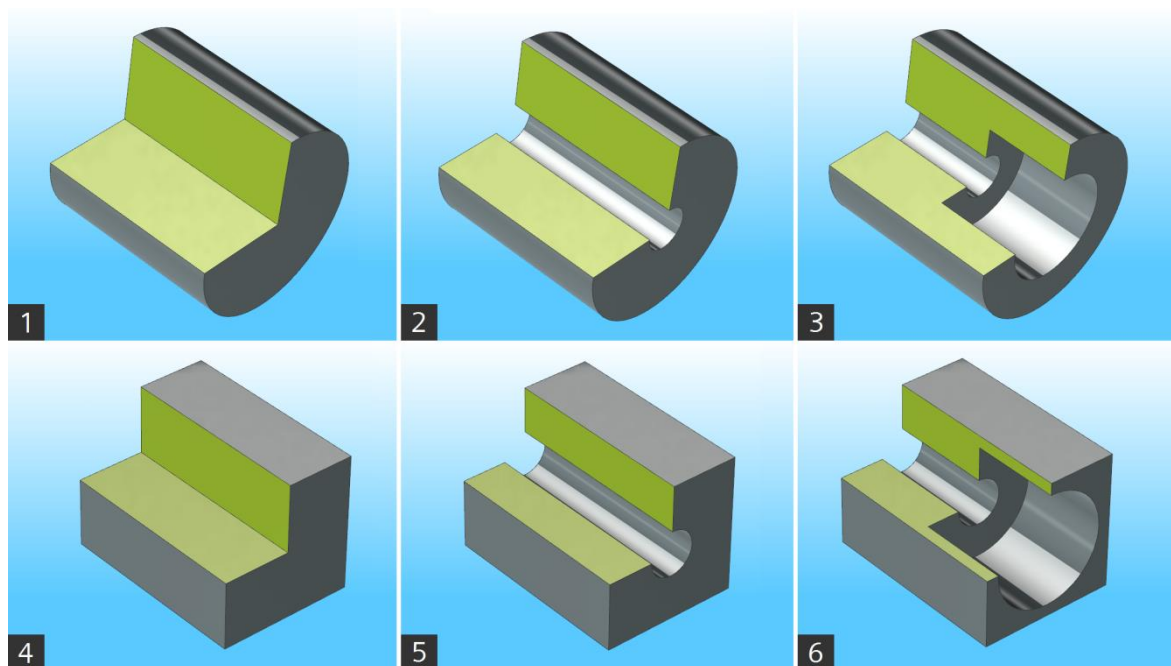
Kromě výsledného strojního času je třeba posoudit charakter pracovního postupu – způsob a počet upnutí (přípravné časy), počet nástrojů, příp. i s náklady na jejich pořízení, dále náklady na výchozí polotovar apod. Snahou je včas zaznamenat a eliminovat všechna případná omezení a technicky neřešitelné problémy v některém z následujících kroků technologické přípravy výroby (omezení kinematiky, výkonu nebo jiného parametru stroje, možností řídicího systému a postprocesoru, apod.).

### 3.2 Volba polotovaru

Mezi dodávané polotovary předepsané jakosti patří výkovky kruhového a čtvercového průřezu. Většina dodavatelů disponuje produktivním hrubovacím vybavením, proto je možné objednat také polotovary předhrubované.

V úvaze je celkem šest variant výkovků (obr. 11):

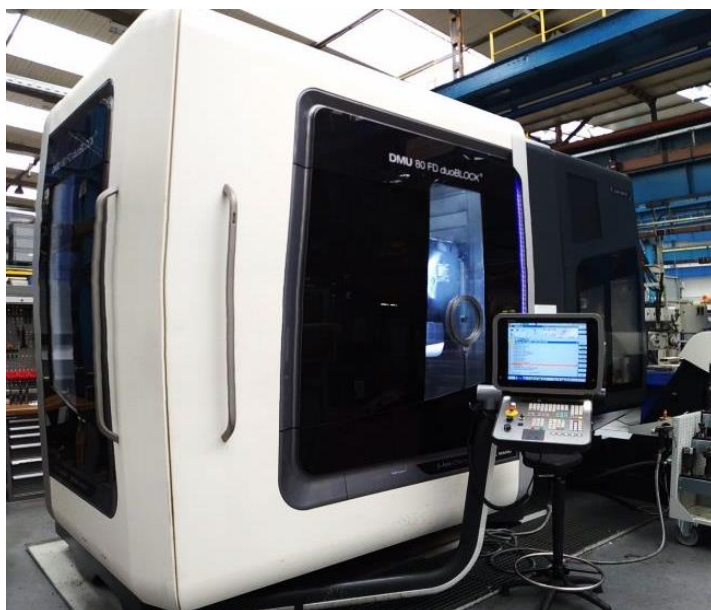
- varianta 1: kruhový průřez ( $\varnothing$  345 x 342 mm),
- varianta 2: kruhový průřez s předvrtanou dírou  $\varnothing$  94 mm,
- varianta 3: kruhový průřez s předvrtanou dírou  $\varnothing$  94 mm a  $\varnothing$  194 mm,
- varianta 4: čtvercový průřez (246 x 246 x 342 mm),
- varianta 5: čtvercový průřez s předvrtanou dírou  $\varnothing$  94 mm,
- varianta 6: čtvercový průřez s předvrtanou dírou  $\varnothing$  94 mm a  $\varnothing$  194 mm.



Obr. 11 Varianty polotovaru: 1) kruhový průřez  $\varnothing$  345 x 342 mm, 2) kruhový průřez s předvrtanou dírou  $\varnothing$  94 mm, 3) kruhový průřez s předvrtanou dírou  $\varnothing$  94 mm a  $\varnothing$  194 mm, 4) čtvercový průřez 246 x 246 x 342 mm, 5) čtvercový průřez s předvrtanou dírou  $\varnothing$  94 mm, 6) čtvercový průřez s předvrtanou dírou  $\varnothing$  94 mm a  $\varnothing$  194 mm.

### 3.3 Volba stroje

Návrh nové technologie je postaven na využití části potenciálu jednoho z nejmodernějších pracovišť firmy vybaveného obráběcím centrem výrobce DMG Mori s možností karuselového soustružení (obr. 12, obr. 14 vpravo). Z rozboru součásti a ze skutečnosti, že je dílec v celém rozsahu vyrobitelný metodami třískového obrábění (ve srovnání těchto metod například s novodobými trendy aditivních technologií o nich již lze hovořit jako o konvenčních), plyne výhoda nasazení stroje s takto pokročilou kinematikou (obr. 13) v souvislosti s vysokou pravděpodobností obrobení součástky na malý počet ustavení bez nutnosti zařazení dalších operací - využití vysokého pracovního výkonu ve vztahu k jednomu upnutí obrobku (dosažení vysoké produktivity).



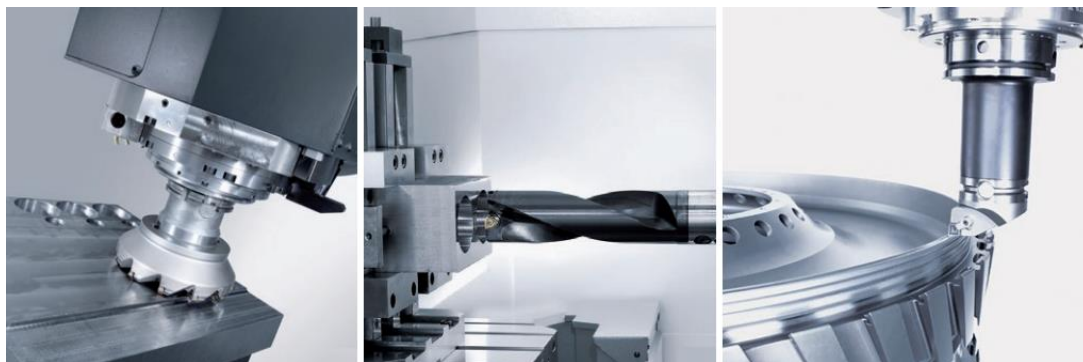
Obr. 12 DMU 80 FD duoBlock.



Obr. 13 Nástrojové vřeteno.

Stroj pracuje se řídícím systémem Sinumerik 840D sl a je vybaven zásobníkem na 63 nástrojů. Hlavní vřeteno dosahuje plynule volitelných otáček až  $12\,000\text{ min}^{-1}$ , otočný stůl až  $800\text{ min}^{-1}$ ; užitečný výkon na vřetení 24 kW, na stole 36 kW a krouticí moment na vřetení 77 Nm, na stole 2 050 Nm. Maximální tlak procesní kapaliny pro nástroje s vnitřním chlazením je 70 bar. Základní parametry stroje jsou uvedeny v tab. 4 [13].

Z podkapitoly 3.1 a 3.2 je patrné relativně velké množství potenciálních řešení výrobního postupu a parametrů, které je třeba vyhodnotit pro volbu nejvýhodnější varianty.

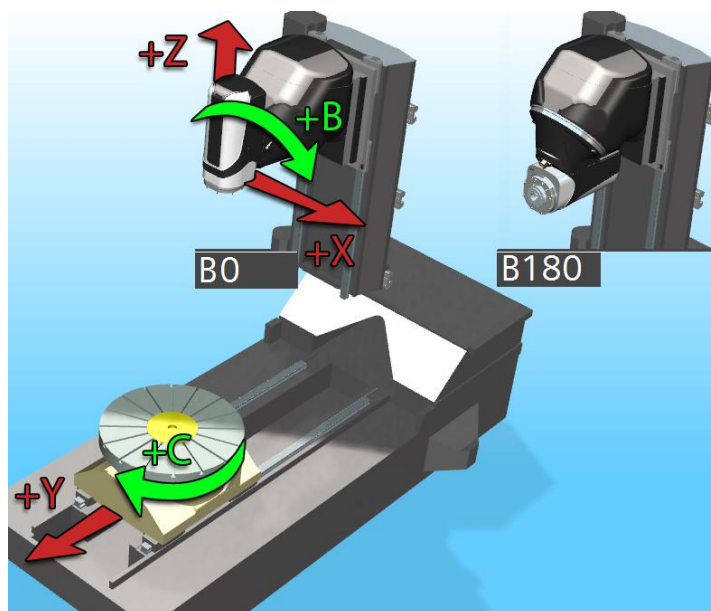


Obr. 14 Možnosti využití stroje [10].



Tab. 4 Základní technické parametry stroje [10].

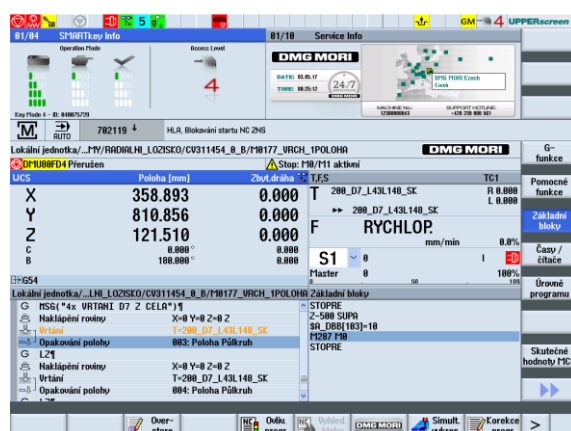
|                                     |                         |                        |
|-------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Průměr otočného stolu               | [mm]                    | 800                    |
| Přípustné rozměry obrobku           | [mm]                    | Ø 950 x 1 450          |
| Přípustná hmotnost obrobku          | [kg]                    | 1 300                  |
| Pojezd lineárních os X, Y, Z        | [mm]                    | 800, 1 050, 800        |
| Rozsah osy B / osy C                | [°]                     | -30 až 180 / 0 až 360  |
| Velikost rychloposuvu v ose X, Y, Z | [mm.min <sup>-1</sup> ] | 60 000                 |
| Výkon motoru vřetene / motoru stolu | [kW]                    | 24 / 36                |
| Krouticí moment vřetene / stolu     | [Nm]                    | 77 / 2 050             |
| Rozsah otáček vřetene / stolu       | [min <sup>-1</sup> ]    | 0 až 12 000 / 0 až 800 |
| Systém upínání nástrojů             | [-]                     | HSK63-A                |
| Kapacita zásobníku nástrojů         | [-]                     | 63                     |
| Řídicí systém                       | [-]                     | Sinumerik 840D sl      |
| Rozměry stroje (d x š x v)          | [mm]                    | 4 465 x 3 427 x 3 655  |



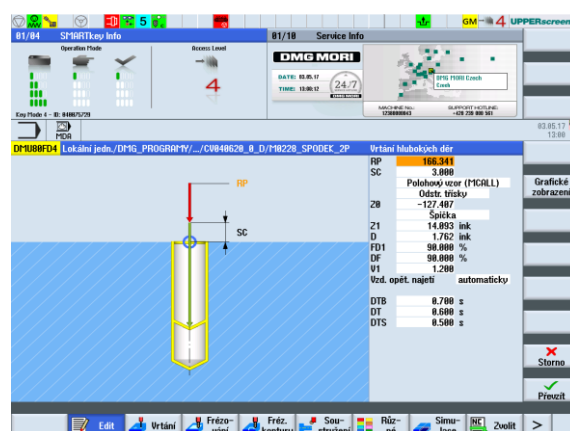
Obr. 15 Kinematika stroje.



Obr. 16 Ukázka naklonění osy B.



Obr. 17 Sinumerik 840D sl.



Obr. 18 Strojní cyklus.

### 3.3.1 Kontrolní výpočty pro frézovací operace

Stanovení hodnot výkonu a krouticího momentu stroje má zásadní význam v souvislosti s hrubovacími operacemi – tj. operacemi s největšími objemovými úběry materiálu v čase.

Z pohledu podmínek firmy byly navrženy relativně produktivní nástroje pro hrubování obrobku. Volbu hospodárných řezných parametrů dokumentuje tab. 6, ve které jsou uvedeny parametry  $f_z$  a  $a_p$ , které nejvíce ovlivňují řeznou sílu a tím i požadovaný výkon a krouticí moment na vřetení (řezná rychlost  $v_c$  byla ve výpočtech konstantní). V kontrolních výpočtech je zahrnuta hodnota měrné řezné síly  $k_{c1} = 1\,950\text{ MPa}$  a exponentu  $m_c = 0,25$ .

Pro frézování rovinných ploch byla použita čelní fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD) ze slinutých karbidů (SK) Ø 63 mm se 6 zuby. Výpočty jsou demonstrovány na parametrech, uvedených v tab. 5.

Tab. 5 Parametry pro hrubovací frézu Ø 63 mm.

| $v_c$                  | $n$                  | $f_z$ | $a_p$ | $a_e$ | $\kappa_r$ |
|------------------------|----------------------|-------|-------|-------|------------|
| [m.min <sup>-1</sup> ] | [min <sup>-1</sup> ] | [mm]  | [mm]  | [mm]  | [mm]       |
| 300                    | 1 516                | 0,3   | 5     | 47    | 45 °       |

Úhel záběru frézy  $\varphi$ :

(3.1)

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 [^\circ]$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{2 \cdot x}{D} = \frac{2 \cdot \left(a_e - \frac{D}{2}\right)}{D} = \frac{2 \cdot a_e}{D} - 1$$

$$\varphi = \varphi_1 + \sin^{-1} \left( \frac{2 \cdot a_e}{D} - 1 \right) = 90 + \sin^{-1} \left( \frac{2 \cdot 47}{63} - 1 \right) = 119,5^\circ$$

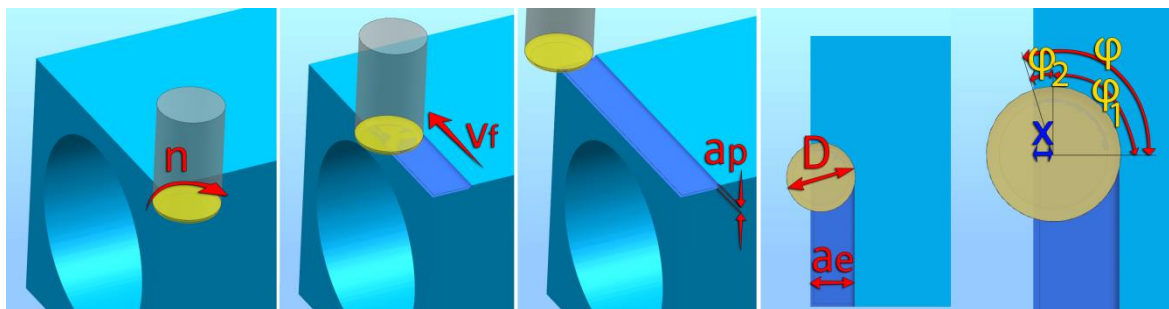
kde:  $\varphi_i$  [°] jednotlivé úhly celkového úhlu záběru frézy  $\varphi$ ,  
 $D$  [mm] průměr frézy,  
 $a_e$  [mm] šířka frézované plochy.

Počet zubů v záběru  $n_z$  [16]:

(3.2)

$$n_z = \frac{\varphi}{360} \cdot z = \frac{119,5}{360} \cdot 6 \cong 2$$

kde:  $z$  [-] počet zubů frézy.



Obr. 19 Úhel záběru frézy  $\varphi$ .

Jmenovitá tloušťka třísky  $h_D$  pro čelní frézování [8]: (3.3)

$$h_D = f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi \text{ [mm]}$$

kde:  $f_z$  [mm] posuv na zub,  
 $\kappa_r$  [°] úhel nastavení hlavního ostří.

Jmenovitá šířka třísky  $b_D$  pro čelní frézování [8]: (3.4)

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \text{ [mm]}$$

kde:  $a_p$  [mm] šířka záběru ostří.

Jmenovitý průřez třísky  $A_{Di}$  pro  $i$ -tý zub [8]: (3.5)

$$A_{Di} = h_{Di} \cdot b_{Di} = f_z \cdot a_p \cdot \frac{\sin \varphi}{n_z} = \frac{0,3 \cdot 5 \cdot \sin 119,5}{2} = 0,65 \text{ mm}^2$$

Měrná řezná síla  $k_c$  [8]: (3.6)

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_D^{m_c}} = \frac{k_{c1}}{(f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi)^{m_c}} \text{ [MPa]}$$

$$k_c = \frac{1\,950}{(0,3 \cdot \sin 45 \cdot \sin 119,5)^{0,25}} = 2\,974,8 \text{ MPa}$$

kde:  $k_{c1}$  [MPa] měrná řezná síla,  
 $v_c$  [m.min<sup>-1</sup>] řezná rychlost,  
 $m_c$  [-] exponent závislý na vlastnostech materiálu.

Síla, působící na  $i$ -tý zub  $F_{ci}$  [8]: (3.7)

$$F_{ci} = A_{Di} \cdot k_{ci} = 0,65 \cdot 2\,974,8 = 1\,933,6 \text{ N}$$

Celková řezná síla  $F_c$  [8]: (3.8)

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} A_{Di} \cdot k_{ci} = \sum_{i=1}^2 0,65 \cdot 2\,974,80 = 3\,867,2 \text{ N}$$

Řezný výkon  $P_c$  [8]: (3.9)

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} = \frac{3\,867,24 \cdot 300}{6 \cdot 10^4} = 19,34 \text{ kW}$$

Krouticí moment  $M_c$ : (3.10)

$$M_c = \frac{F_c \cdot D}{2 \cdot 10^3} = \frac{3\,867,24 \cdot 63}{2 \cdot 10^3} = 121,8 \text{ Nm}$$

Výpočet výkonnosti frézování  $Q_f$ :

(3.11)

$$Q_f = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f}{1\,000} = \frac{5 \cdot 47 \cdot 2\,728}{1\,000} = 641,08 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

kde:  $v_f$  [mm.min<sup>-1</sup>] posuvová rychlost.

Při řezné rychlosti  $v_c = 300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  dosahuje vřeteno otáček  $n = 1\,516 \text{ min}^{-1}$ . Této hodnotě odpovídá dostupný výkon stroje  $P_{cs} = 12,5 \text{ kW}$  a krouticí moment  $M_{cs} = 77 \text{ kW}$  (odečteno z diagramu výkonu a krouticího momentu stroje). Ze vztahů (3.9) a (3.10) vyplývá, že zvolené řezné podmínky jsou neslučitelné s možnostmi stroje (výkon překročen o 55 %, krouticí moment o 58 %) a je nutné přistoupit k jejich výraznému snížení. Výkon a krouticí moment nejvíce ovlivňují parametry šířky záběru  $a_p$ , posuvu na zub  $f_z$  a řezná rychlost  $v_c$ . Jejich snížením však úměrně klesá výkonnost obrábění a narůstá obráběcí čas. Efekt provedených změn je zanesen do tab. 6 (seřazeno dle výkonnosti obrábění  $Q$ ). Kritériem pro volbu hospodárných parametrů je nejvyšší produktivita a dosažení max. 60 % možností stroje. Nejproduktivnější variantou v tomto ohledu je volba  $a_p = 2 \text{ mm}$  a  $f_z = 0,2 \text{ mm}$  (snížení původních hodnot výkonnosti obrábění o 73 %). Tyto parametry je však zapotřebí experimentálně ověřit, případně optimalizovat (trvanlivost, vibrace, apod.).

Tab. 6 Volba hospodárných řezných podmínek pro frézování.

| $a_p$      | $f_z$      | $v_f$                   | $Q$                                   | $F_c$          | $P_c$      | $M_c$       | VV          | VKM         |
|------------|------------|-------------------------|---------------------------------------|----------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| [mm]       | [mm]       | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ] | [N]            | [kW]       | [Nm]        | [%]         | [%]         |
| 5,0        | 0,3        | 2 729,8                 | 641,5                                 | 3 883,7        | 19,4       | 122,3       | 155,3       | 158,9       |
| 4,0        | 0,3        | 2 729,8                 | 513,2                                 | 3 107,0        | 15,5       | 97,9        | 124,3       | 127,1       |
| 5,0        | 0,2        | 1 819,8                 | 427,7                                 | 2 865,4        | 14,3       | 90,3        | 114,6       | 117,2       |
| 3,0        | 0,3        | 2 729,8                 | 384,9                                 | 2 330,2        | 11,7       | 73,4        | 93,2        | 95,3        |
| 4,0        | 0,2        | 1 819,8                 | 342,1                                 | 2 292,3        | 11,5       | 72,2        | 91,7        | 93,8        |
| 2,0        | 0,3        | 2 729,8                 | 256,6                                 | 1 553,5        | 7,8        | 48,9        | 62,1        | 63,6        |
| 3,0        | 0,2        | 1 819,8                 | 256,6                                 | 1 719,2        | 8,6        | 54,2        | 68,8        | 70,3        |
| 5,0        | 0,1        | 909,9                   | 213,8                                 | 1 703,8        | 8,5        | 53,7        | 68,2        | 69,7        |
| 4,0        | 0,1        | 909,9                   | 171,1                                 | 1 363,0        | 6,8        | 42,9        | 54,5        | 55,8        |
| <b>2,0</b> | <b>0,2</b> | <b>1 819,8</b>          | <b>171,1</b>                          | <b>1 146,1</b> | <b>5,7</b> | <b>36,1</b> | <b>45,8</b> | <b>46,9</b> |
| 1,0        | 0,3        | 2 729,8                 | 128,3                                 | 776,7          | 3,9        | 24,5        | 31,1        | 31,8        |
| 3,0        | 0,1        | 909,9                   | 128,3                                 | 1 022,3        | 5,1        | 32,2        | 40,9        | 41,8        |
| 2,0        | 0,1        | 909,9                   | 85,5                                  | 681,5          | 3,4        | 21,5        | 27,3        | 27,9        |
| 1,0        | 0,2        | 1 819,8                 | 85,5                                  | 573,1          | 2,9        | 18,1        | 22,9        | 23,4        |
| 1,0        | 0,1        | 909,9                   | 42,8                                  | 340,8          | 1,7        | 10,7        | 13,6        | 13,9        |

VV - využití výkonu; VKM – využití krouticího momentu.



### 3.3.2 Kontrolní výpočty pro vrtací operace

Pro úsek vrtání byl zvolen vrták s VBD Ø 90 mm. Výpočty jsou demonstrovány na parametrech, uvedených v tab. 7.

Tab. 7 Parametry pro vrtání.

| $v_c$                  | $n$                  | $f$  | $v_f$                   | $a_e$ | $\kappa_r$         |
|------------------------|----------------------|------|-------------------------|-------|--------------------|
| [m.min <sup>-1</sup> ] | [min <sup>-1</sup> ] | [mm] | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [mm]  | [mm]               |
| 220                    | 778,1                | 0,3  | 233,4                   | -     | $\approx 90^\circ$ |

Průřez třísky  $A_D$  [8]:

(3.12)

$$A_D = h_D \cdot b_D = \frac{f \cdot \sin \kappa_r}{2} \cdot \frac{D}{2 \sin \kappa_r} = \frac{f \cdot D}{4} [\text{mm}^2]$$

$$A_D = \frac{0,3 \cdot 90}{4} = 6,75 \text{ mm}^2$$

kde:  $h_D$  [mm] tloušťka třísky,  
 $b_D$  [mm] šířka třísky,  
 $f$  [mm] posuv na otáčku,  
 $D$  [mm] průměr vrtáku,  
 $\kappa_r$  [°] úhel nastavení hlavního ostří.

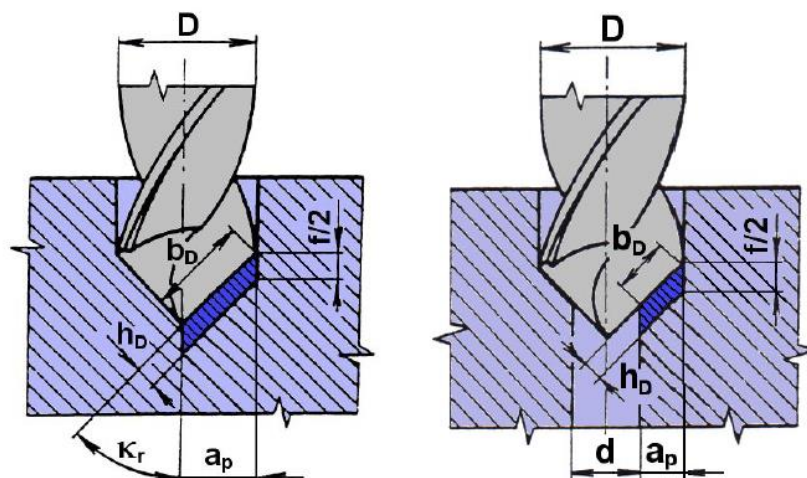
Měrná řezná síla  $k_c$  [8]:

(3.13)

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_D^{m_c}} = \frac{k_{c1}}{\left(\frac{f \cdot \sin \kappa_r}{2}\right)^{m_c}} = \frac{2^{m_c} \cdot k_{c1}}{(f \cdot \sin \kappa_r)^{m_c}} [\text{MPa}]$$

$$k_c = \frac{2^{0,25} \cdot 1\,950}{(0,3 \cdot \sin 90)^{0,25}} = 3\,133,4 \text{ MPa}$$

kde:  $k_{c1}$  [MPa] měrná řezná síla obráběného materiálu,  
 $m_c$  [-] exponent závislý na vlastnostech materiálu.



Obr. 20 Průřez třísky při vrtání dvoubřitým šroubovým vrtákem [17].

Řezná síla  $F_c$  [8]: (3.14)

$$F_c = A_D \cdot k_c = 6,75 \cdot 3\,133,4 = 21\,150,5\,N$$

Řezný výkon  $P_c$  [8]: (3.15)

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{2 \cdot 6 \cdot 10^4} = \frac{21\,150,5 \cdot 220}{2 \cdot 6 \cdot 10^4} = 38,8\,kW$$

kde:  $v_c$  [m.min<sup>-1</sup>] řezná rychlost.

Krouticí moment  $M_c$  [8]: (3.16)

$$M_c = \frac{F_c \cdot D}{4 \cdot 10^3} = \frac{21\,150,5 \cdot 90}{4 \cdot 10^3} = 475,9\,Nm$$

Počet otáček stolu  $n$  [13]: (3.17)

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D_c} \frac{1000 \cdot 220}{\pi \cdot 90} = 778,1\,min^{-1}$$

Výpočet výkonnosti vrtání  $Q_v$ : (3.18)

$$Q_v = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot v_f}{4 \cdot 1\,000} = \frac{\pi \cdot 90^2 \cdot 233,4}{4 \cdot 1\,000} = 566,2\,cm^3 \cdot min^{-1}$$

kde:  $v_f$  [mm.min<sup>-1</sup>] posuvová rychlost.

V tab. 8 (seřazeno dle výkonnosti  $Q$ ) je uvedena volba řezných podmínek pro předvrtání otvoru Ø 90 mm. Při řezné rychlosti  $v_c = 220\,m \cdot min^{-1}$  dosahuje stůl otáček  $n = 778,1\,min^{-1}$ , výkonu 34,5 kW a krouticího momentu 2 050 Nm.

Tab. 8 Volba hospodárných řezných podmínek pro vrtání.

| $v_c$        | $f$        | $v_f$                   | $Q$                                   | $F_c$          | $P_c$       | $M_c$        | VV          | VKM         |
|--------------|------------|-------------------------|---------------------------------------|----------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| [mm]         | [mm]       | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ] | [N]            | [kW]        | [Nm]         | [%]         | [%]         |
| 220,0        | 0,3        | 233,4                   | 1 485,0                               | 21 150,3       | 38,8        | 475,9        | 112,4       | 23,2        |
| 200,0        | 0,3        | 212,2                   | 1 350,0                               | 21 150,3       | 35,3        | 475,9        | 111,9       | 23,2        |
| 180,0        | 0,3        | 191,0                   | 1 215,0                               | 21 150,3       | 31,7        | 475,9        | 112,5       | 23,2        |
| 160,0        | 0,3        | 169,8                   | 1080,0                                | 21 150,3       | 28,2        | 475,9        | 112,8       | 23,2        |
| 220,0        | 0,2        | 155,6                   | 990,0                                 | 15 604,4       | 28,6        | 351,1        | 82,9        | 17,1        |
| 200,0        | 0,2        | 141,5                   | 900,0                                 | 15 604,4       | 26,0        | 351,1        | 82,6        | 17,1        |
| 180,0        | 0,2        | 127,3                   | 810,0                                 | 15 604,4       | 23,4        | 351,1        | 83,0        | 17,1        |
| 160,0        | 0,2        | 113,2                   | 720,0                                 | 15 604,4       | 20,8        | 351,1        | 83,2        | 17,1        |
| <b>220,0</b> | <b>0,1</b> | <b>77,8</b>             | <b>495,0</b>                          | <b>9 278,4</b> | <b>17,0</b> | <b>208,8</b> | <b>47,3</b> | <b>10,2</b> |
| 200,0        | 0,1        | 70,7                    | 450,0                                 | 9 278,4        | 15,5        | 208,8        | 44,8        | 10,2        |
| 180,0        | 0,1        | 63,7                    | 405,0                                 | 9 278,4        | 13,9        | 208,8        | 49,4        | 10,2        |
| 160,0        | 0,1        | 56,6                    | 360,0                                 | 9 278,4        | 12,4        | 208,8        | 49,5        | 10,2        |

VV - využití výkonu; VKM - využití krouticího momentu.

### 3.3.3 Kontrolní výpočty pro soustružnické operace

Pro soustružení byl zvolen vnitřní nůž s VBD. Výpočty jsou demonstrovány na parametrech, uvedených v tab. 9.

Tab. 9 Parametry pro hrubování soustružnickým nožem.

| $v_c$                  | $n$                  | $f$  | $a_p$ | $a_e$ | $\kappa_r$ |
|------------------------|----------------------|------|-------|-------|------------|
| [m.min <sup>-1</sup> ] | [min <sup>-1</sup> ] | [mm] | [mm]  | [mm]  | [mm]       |
| 150                    | 530,5                | 0,3  | 4     | -     | 95 °       |

Průřez třísky  $A_D$  [8]: (3.19)

$$A_D = h_D \cdot b_D = f \cdot \sin \kappa_r \cdot \frac{a_p}{\sin \kappa_r} = a_p \cdot f \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A_D = 4 \cdot 0,3 = 1,2 \text{ mm}^2$$

kde:  $h_D$  [mm] tloušťka třísky,  
 $b_D$  [mm] šířka třísky,  
 $f$  [mm] posuv na otáčku,  
 $\kappa_r$  [°] úhel nastavení hlavního ostří,  
 $a_p$  [mm] šířka záběru ostří.

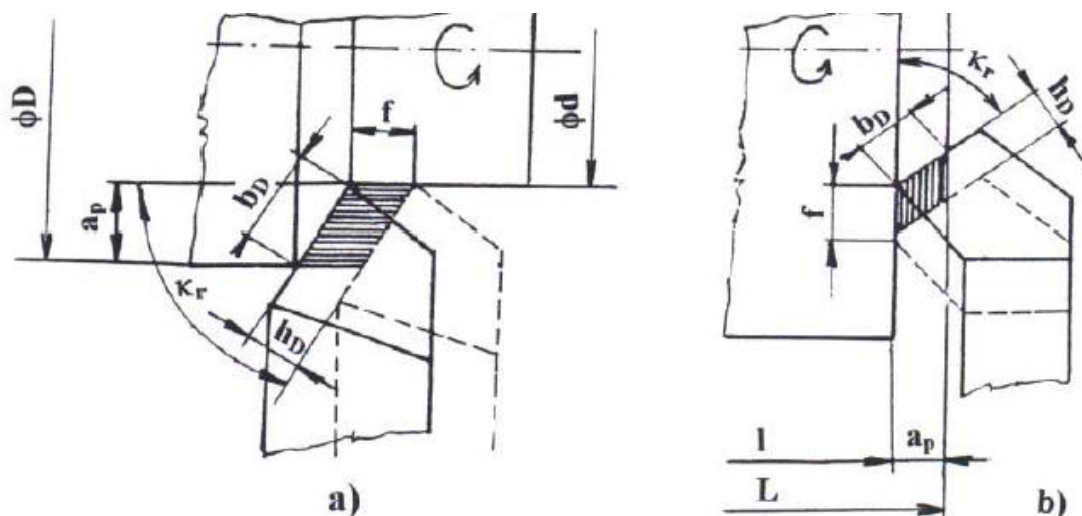
Měrná řezná síla  $k_c$  [8]: (3.20)

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h_D^{m_c}} = \frac{k_{c1}}{(f \cdot \sin \kappa_r)^{m_c}} \frac{1950}{(0,3 \cdot \sin 95)^{0,25}} = 2\,637,4 \text{ MPa}$$

kde:  $k_{c1}$  [MPa] měrná řezná síla obráběného materiálu,  
 $m_c$  [-] exponent závislý na vlastnostech materiálu.

Řezná síla  $F_c$  [8]: (3.21)

$$F_c = A_D \cdot k_c = 1,2 \cdot 2\,637,4 = 3\,164,9 \text{ N}$$



Obr. 21 Identifikace průřezu třísky při soustružení [16]: a) válcová plocha; b) čelní plocha.

Řezný výkon  $P_c$  [8]: (3.22)

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} = \frac{3\,164,9 \cdot 150}{6 \cdot 10^4} = 7,91 \text{ kW}$$

kde:  $v_c$  [m.min<sup>-1</sup>] řezná rychlost.

Krouticí moment  $M_c$ : (3.23)

$$M_c = \frac{F_c \cdot D}{2} = \frac{3\,164,9 \cdot 0,2}{2} = 316,5 \text{ Nm}$$

Počet otáček stolu  $n$  [13]: (3.24)

$$n = \frac{1\,000 \cdot v_c}{\pi \cdot \left(\frac{D+d}{2}\right)} [\text{min}^{-1}]$$

$$n = \frac{1\,000 \cdot 150}{\pi \cdot \left(\frac{200+90}{2}\right)} = 329,3 \text{ min}^{-1}$$

kde:  $D$  [mm] soustružený průměr,  
 $d$  [mm] průměr předvrtané díry.

Výpočet výkonnosti soustružení  $Q_s$  [8]: (3.25)

$$Q_s = v_c \cdot a_p \cdot f = 150 \cdot 4 \cdot 0,3 = 180 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

Při řezné rychlosti  $v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  dosahuje vřeteno otáček  $n = 329,3 \text{ min}^{-1}$  (střední průměr). Této hodnotě odpovídá dostupný výkon stroje  $P_{cs} = 14,8 \text{ kW}$  a krouticí moment  $M_{cs} = 2\,050 \text{ Nm}$  (odečteno z diagramu výkonu a krouticího momentu stroje). Volbu hospodárných řezných podmínek vystihuje tab. 10 (seřazeno dle výkonnosti  $Q$ ).

Tab. 10 Volba hospodárných řezných podmínek pro soustružení.

| $a_p$      | $f$        | $v_f$                   | $Q$                                   | $F_c$          | $P_c$      | $M_c$        | VV          | VKM         |
|------------|------------|-------------------------|---------------------------------------|----------------|------------|--------------|-------------|-------------|
| [mm]       | [mm]       | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ] | [N]            | [kW]       | [Nm]         | [%]         | [%]         |
| <b>4,0</b> | <b>0,3</b> | <b>98,8</b>             | <b>180,0</b>                          | <b>3 164,8</b> | <b>7,9</b> | <b>316,5</b> | <b>53,5</b> | <b>15,4</b> |
| 3,0        | 0,3        | 98,8                    | 135,0                                 | 2 373,6        | 5,9        | 237,4        | 40,1        | 11,6        |
| 4,0        | 0,2        | 65,9                    | 120,0                                 | 2 335,0        | 5,8        | 233,5        | 39,4        | 11,4        |
| 2,0        | 0,3        | 98,8                    | 90,0                                  | 1 582,4        | 4,0        | 158,2        | 26,7        | 7,7         |
| 3,0        | 0,2        | 65,9                    | 90,0                                  | 1 751,2        | 4,4        | 175,1        | 29,6        | 8,5         |
| 2,0        | 0,2        | 65,9                    | 60,0                                  | 1 167,5        | 2,9        | 116,7        | 19,7        | 5,7         |
| 4,0        | 0,1        | 32,9                    | 60,0                                  | 1 388,4        | 3,5        | 138,8        | 23,5        | 6,8         |
| 1,0        | 0,3        | 98,8                    | 45,0                                  | 791,2          | 2,0        | 79,1         | 13,4        | 3,9         |
| 3,0        | 0,1        | 32,9                    | 45,0                                  | 1 041,3        | 2,6        | 104,1        | 17,6        | 5,1         |
| 1,0        | 0,2        | 65,9                    | 30,0                                  | 583,7          | 1,5        | 58,4         | 9,9         | 2,8         |
| 2,0        | 0,1        | 32,9                    | 30,0                                  | 694,2          | 1,7        | 69,4         | 11,7        | 3,4         |
| 1,0        | 0,1        | 32,9                    | 15,0                                  | 347,1          | 0,9        | 34,7         | 5,9         | 1,7         |

VV - využití výkonu; VKM - využití krouticího momentu.

### 3.4 Náklady na polotovár

Cena polotovaru je závislá na způsobu jeho zpracování, hmotnosti, požadované jakosti, případně na rozsahu dodatečných úprav. Vliv rozměrů (hmotnosti) na celkovou cenu je patrný z tab. 11, kde mezi plným válcem (varianta 1) a plným kvádrem (varianta 4) je cenový rozdíl 15 500 Kč. Varianta 4, jako ta s nejnižší cenou, je zvolena jako referenční pro porovnání zbylých variant.

Tab. 11 Náklady na polotovár v Kč.

| Varianta | 1      | 2      | 3      | 4             | 5      | 6      |
|----------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|
| Cena     | 44 050 | 45 360 | 46 150 | <b>28 550</b> | 29 860 | 30 650 |
| Rozdíl   | 15 500 | 16 810 | 17 600 | -             | 1 310  | 2 100  |

### 3.5 Náklady na strojní čas hrubování

Kromě výhody volby polotovarů čtvercových průřezů pojednává tab. 11 také o zvýšených nákladech spojených s případnou dodatečnou úpravou (předvrtání díry Ø 94 mm + 1 310 Kč, předvrtání Ø 94 mm a Ø 194 mm + 2 100 Kč). V případě dostupnosti strojů pro těžké hrubování má smysl porovnávat tento nárůst ceny s možností nákupu standardně dodávaného polotovaru a zařazení vlastních hrubovacích operací. Z důvodu, že takové stroje nejsou k dispozici a z důvodu redukce počtu výrobních operací je v úvaze hrubování na stroji DMU. Smyslem je interpretace nákladů, nezbytných pro dosažení stavu šesti varianty s přídatky 3 mm na plochu a porovnání nákladů na vlastní řešení hrubování a na hrubování dodavatelem.

Z kontrolních výpočtů pro jednotlivé hrubovací operace vyplynuly nároky na výkon a krouticí moment stroje. S ohledem na zvýšení potřebného výkonu v souvislosti s opotřebením nástroje apod., došlo ke snížení původních řezných parametrů, které shrnuje tab. 12. Tab. 13 porovnává objem hotové součásti s objemem vyhrubovaného polotovaru. Dle vztahu (3.26) je uveden ukazatel využití materiálu. Objem odebíraného materiálu je dále rozdělen pro jednotlivé hrubovací nástroje ( $V_{pf}$  pro frézování,  $V_{pv}$  pro vrtání a  $V_{ps}$  pro soustružení). Hmotnost  $m_{0NX} = 95,46$  kg a objem  $V_{0NX} = 0,0122$  m<sup>3</sup> hotové součásti byly zjištěny objemovou analýzou těles v SW NX10; přesnost analýzy byla ověřena početně.

Tab. 12 Parametry hrubovacích nástrojů.

| Nástroj                 | $v_c$<br>[m.min <sup>-1</sup> ] | $a_p$<br>[mm] | $a_e$<br>[mm] | $f$<br>[mm] | $v_f$<br>[mm.min <sup>-1</sup> ] | $Q$<br>[cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ] |
|-------------------------|---------------------------------|---------------|---------------|-------------|----------------------------------|--|
| Fréza VBD Ø 63 mm       | 300                             | 2             | 47            | -           | 1 820,0                          | 171,1  |
| Vrták VBD Ø 90 mm       | 220                             | -             | -             | 0,1         | 77,8                             | 495,0  |
| Soustružnický nůž s VBD | 220                             | 4             | -             | 0,3         | 98,8                             | 180,0  |

Ukazatel využití materiálu pro variantu 1  $u_{sm1}$ :

(3.26)

$$u_{sm1} = \frac{V_{0NX}}{V_{p1}} \cdot 100 [\%]$$

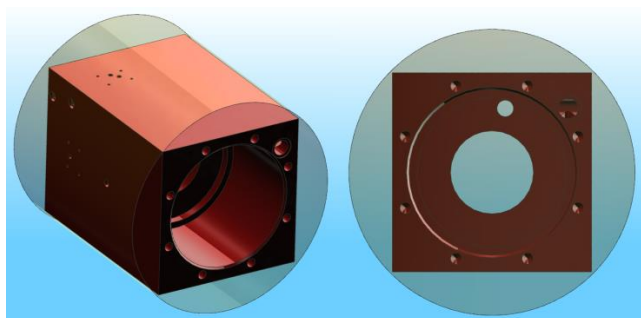
$$u_{sm1} = \frac{0,0122}{0,0320} \cdot 100 = 38,1 \%$$

kde:  $V_{0NX}$  [m<sup>3</sup>] objem hotové součásti dle NX10,  
 $V_{p1}$  [m<sup>3</sup>] objem polotovaru varianty 1.

Tab. 13 Přebytečný materiál podle varianty polotovaru.

| Varianta               |                   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6           |
|------------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| Objem součásti         | [m <sup>3</sup> ] | 0,0122 |        |        |        |        |             |
| Objem polotovaru       |                   | 0,0320 | 0,0298 | 0,0263 | 0,0207 | 0,0183 | 0,0149      |
| Rozdíl                 |                   | 0,0198 | 0,0176 | 0,0141 | 0,0085 | 0,0061 | 0,0027      |
| - Frézování $V_{pf}$   |                   | 0,0113 | 0,0113 | 0,0113 | -      | -      | -           |
| - Vrtání $V_{pv}$      |                   | 0,0022 | 0,0022 | 0,0022 | 0,0022 | 0,0022 | 0,0022      |
| - Soustružení $V_{ps}$ |                   | 0,0035 | 0,0035 | 0,0035 | 0,0035 | 0,0035 | 0,0035      |
| Využití materiálu      | [%]               | 38,1   | 40,9   | 46,4   | 58,9   | 66,7   | <b>81,9</b> |

Pozn.: součet objemů  $V_{pf}$ ,  $V_{pv}$  a  $V_{ps}$  není rozdílem objemů polotovaru a hotové součásti. Není zde totiž uvažován objem zbylých prvků součásti, jako jsou propojovací díry apod.



Obr. 22 Přebytečný materiál u polotovarů kruhových průřezů.

Výpočet strojního času frézování  $t_{sof}$  pomocí objemů: (3.27)

$$t_{sof} = \frac{V_{pf}}{Q_f} = \frac{1,13 \cdot 10^{-2}}{1,71 \cdot 10^{-4}} = 66,08 \text{ min}$$

kde:  $V_{pf}$  [m<sup>3</sup>] objem materiálu pro frézování,  
 $Q_f$  [m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>] výkonnost frézování.

Výpočet strojního času vrtání  $t_{sov}$  pomocí objemů: (3.28)

$$t_{sov} = \frac{V_{pv}}{Q_v} = \frac{2,20 \cdot 10^{-3}}{4,95 \cdot 10^{-4}} = 4,44 \text{ min}$$

kde:  $V_{pv}$  [m<sup>3</sup>] objem materiálu pro vrtání,  
 $Q_v$  [m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>] výkonnost vrtání.

Výpočet strojního času soustružení  $t_{sos}$  pomocí objemů: (3.29)

$$t_{sos} = \frac{V_{ps}}{Q_s} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 10^{-4}} = 19,44 \text{ min}$$

kde:  $V_{ps}$  [m<sup>3</sup>] objem materiálu pro soustružení,  
 $Q_s$  [m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>] výkonnost soustružení.

Výpočet celkového strojního času  $t_{so}$ : (3.30)

$$t_{so} = t_{sof} + t_{sov} + t_{sos} = 66,08 + 4,44 + 19,44 = 89,96 \text{ min}$$

Tab. 14 shrnuje náklady na výchozí polotovar rozšířené o náklady na hrubování. Hodinová sazba stroje byla vypočtena ze vztahu (7.1). Na základě výpočtu ukazatele spotřeby materiálu a nákladů spojených s hrubováním jsou smysluplné pouze varianty 5 a 6. Při srovnání nákladů těchto variant (varianta 6 dražší o 188,7 Kč) a snaze o nejnížší pracnost (eliminace soustružení) **je nejvýhodnější zvolit variantu 6.**

Tab. 14 Náklady na polotovar rozšířené o náklady na hrubování.

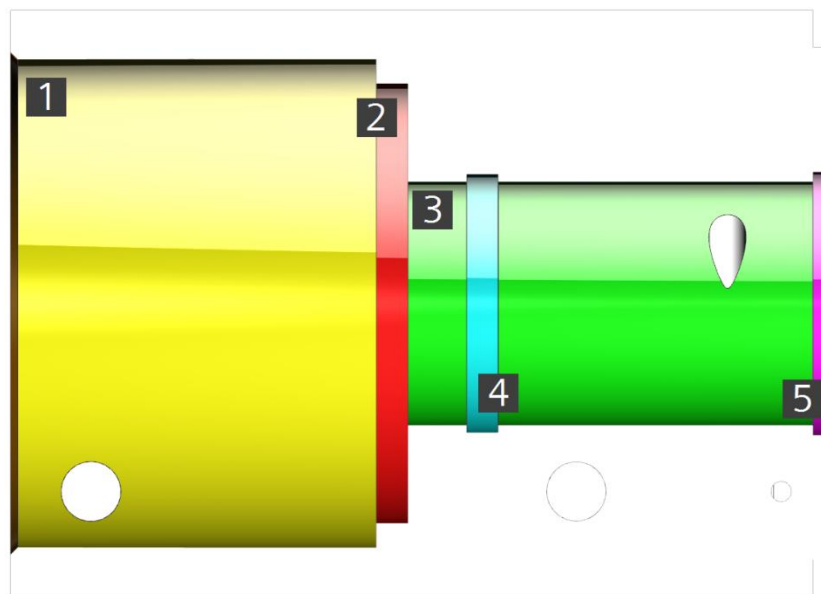
| Varianta | $N_{hps}$ | Cena polotovaru | Strojní čas hrubování | Náklady na hrubování | $N_{ph}$ |
|----------|-----------|-----------------|-----------------------|----------------------|----------|
|          | [Kč]      | [Kč]            | [min]                 | [Kč]                 | [Kč]     |
| 1        | 1 850     | 44 050          | 90,0                  | 2 775,0              | 46 825,0 |
| 2        |           | 45 360          | 85,5                  | 2 636,3              | 47 996,3 |
| 3        |           | 46 150          | 66,1                  | 2 038,1              | 48 188,1 |
| 4        |           | 28 550          | 23,9                  | 736,9                | 29 286,9 |
| 5        |           | 29 860          | 19,5                  | 601,3                | 30 461,3 |
| 6        |           | 30 650          | 0                     | 0                    | 30 650,0 |

$N_{hps}$  - náklady na hodinu provozu stroje,

$N_{ph}$  - náklady na polotovar rozšířené o náklady na hrubování.

### 3.6 Návrh řešení opracování vnitřního tvaru

Vnitřnímu tvaru je věnována samostatná podkapitola, jelikož jeho opracování je možné realizovat soustružením nebo kombinací frézování a vyvrtávání. Tyto obráběcí metody zde budou porovnány z hlediska strojního času a pořizovacích nákladů na nástroje. Výchozím stavem je již vyhrubovaný tvar s přídkovky 3 mm na plochu.



Obr. 23 Řez válcem – detail vnitřního tvaru: 1) Ø 200H8 mm, 2) Ø 180 mm, 3) Ø 100 mm, 4) Ø 106 mm, 5) Ø 108H9 mm.

#### 3.6.1 Soustružení

Opracování sestává ze soustružení pěti vnitřních průměrů (obr. 23) – Ø 200H8 mm (1), Ø 180 mm (2), Ø 100 mm (3), Ø 106 mm (4) a Ø 108H9 mm (5). Pro tyto úseky jsou navrženy 3 obecné nástroje – hrubovací nůž vnitřní T1, zapichovací nůž vnitřní T2 a dokončovací nůž vnitřní T3. Řezné parametry a strojní časy jednotlivých úseků jsou uvedeny v tab. 15. Výpočty byly zautomatizovány pomocí tabulkového editoru.

Strojní čas pro podélné soustružení  $t_{sp}$  [16]: (3.31)

$$t_{sp} = \frac{p_d \cdot L}{v_f} [min]$$

kde: L [mm] délka dráhy nástroje,  
 $p_d$  [-] počet drah nástroje,  
 $v_f$  [mm.min<sup>-1</sup>] rychlost posuvu.

Počet drah nástroje pro podélné soustružení  $p_d$ : (3.32)

$$p_d = \frac{D - d_0}{2 \cdot a_p} [-]$$

kde: D [mm] průměr obrobené součásti,  
 $d_0$  [mm] průměr obráběné součásti,  
 $a_p$  [mm] šířka záběru ostří.



Délka dráhy nástroje pro podélné soustružení  $L$  [16]: (3.33)

$$L = L_n + L_{prac} + L_p \text{ [mm]}$$

kde:  $L_n$  [mm] délka nájezdu,  
 $L_{prac}$  [mm] pracovní délka,  
 $L_p$  [mm] délka přejezdu.

Rychlost posuvu  $v_f$  [13]: (3.34)

$$v_f = f \cdot n = f \cdot \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}]$$

kde:  $f$  [mm] posuv na otáčku,  
 $n$  [min<sup>-1</sup>] otáčky obrobku,  
 $v_c$  [m.min<sup>-1</sup>] řezná rychlost,  
 $D$  [mm] průměr obrobku.

Upravený vztah pro výpočet strojního času podélného soustružení  $t_{sp}$  [16]: (3.35)

$$t_{sp} = \frac{p_d \cdot L}{v_f} = \frac{\left(\frac{D - d_0}{2 \cdot a_p}\right) \cdot (L_n + L_{prac} + L_p)}{f \cdot \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D}} \text{ [min]}$$

$$t_{sp} = \frac{(D - d_0) \cdot (L_n + L_{prac} + L_p) \cdot \pi \cdot D}{2 \cdot a_p \cdot f \cdot 1000 \cdot v_c} \text{ [min]}$$

Strojní čas pro čelní soustružení  $t_{sc}$  [16]: (3.36)

$$t_{sc} = \frac{p_d \cdot L}{v_f} \text{ [min]}$$

kde:  $L$  [mm] délka dráhy nástroje,  
 $p_d$  [-] počet drah nástroje,  
 $v_f$  [mm.min<sup>-1</sup>] rychlost posuvu.

Počet drah nástroje pro čelní soustružení  $p_d$ : (3.37)

$$p_d = \frac{l}{a_p} \text{ [-]}$$

kde:  $l$  [mm] délka dráhy nástroje,  
 $a_p$  [mm] šířka záběru ostří.

Délka dráhy nástroje pro čelní soustružení  $L$  [16]: (3.38)

$$L = L_n + \left(\frac{D - d}{2}\right) + L_p \text{ [mm]}$$

kde:  $L_n$  [mm] délka nájezdu,  
 $D$  [mm] velký průměr obrobku,  
 $d$  [mm] malý průměr obrobku,  
 $L_p$  [mm] délka přejezdu.

Rychlost posuvu  $v_f$  [13]: (3.39)

$$v_f = f \cdot n = f \cdot \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot \left(d + \frac{(D-d)}{2}\right)} = \frac{2f \cdot 1000 \cdot v_c}{\pi(D+d)} [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$$

kde: D [mm] velký průměr obrobku,

d [mm] malý průměr obrobku.

Upravený vztah pro výpočet strojního času čelního soustružení  $t_{sp}$  [16]: (3.40)

$$t_{sp} = \frac{p_d \cdot L}{v_f} = \frac{\left(\frac{l}{a_p}\right) \cdot \left[L_n + \left(\frac{D-d}{2}\right) + L_p\right]}{\frac{2f \cdot 1000 \cdot v_c}{\pi(D+d)}} [\text{min}]$$

$$t_{sp} = \pi l(D+d) \cdot \frac{(2L_n + D - d + 2L_p)}{4a_p \cdot f \cdot 1000 \cdot v_c} [\text{min}]$$

Výpočet strojního času  $t_{sp}$  v úseku hrubování Ø 100 mm: (3.41)

$$t_{sp} = \frac{(D - d_0) \cdot (L_n + L_{prac} + L_p) \cdot \pi \cdot D}{2 \cdot a_p \cdot f \cdot 1000 \cdot v_c} [\text{min}]$$

$$t_{sp} = \frac{(100 - 94) \cdot (3 + 186 + 3) \cdot \pi \cdot 100}{2 \cdot 1,5 \cdot 0,2 \cdot 1000 \cdot 200} = 3,02 \text{ min}$$

Tab. 15 Náklady spojené s opracováním vnitřního tvaru soustružením.

| Úsek                | Nástroj |                              | C <sub>N</sub> | v <sub>f</sub>          | L     | t <sub>AS</sub> |
|---------------------|---------|------------------------------|----------------|-------------------------|-------|-----------------|
|                     |         |                              | [Kč]           | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [mm]  | [min]           |
| hrubování D100      | T1      | Soustružnický nůž<br>vnitřní | 8 250          | 127,4                   | 382,2 | 3,0             |
| hrubování D102      |         |                              |                | 124,9                   | 87,4  | 0,7             |
| hrubování D108      |         |                              |                | 118,0                   | 23,6  | 0,2             |
| hrubování D180      |         |                              |                | 91,0                    | 546,0 | 6,0             |
| hrubování D200      |         |                              |                | 63,7                    | 312,1 | 4,9             |
| hrubování D106      | T2      | Zapichovací nůž<br>vnitřní   | 8 150          | 69,6                    | 20,9  | 0,3             |
| dokončení D106      |         |                              |                | 69,6                    | 20,9  | 0,3             |
| předdokončení tvaru | T3      | Soustružnický nůž<br>vnitřní | 8 250          | 51,0                    | 387,6 | 7,6             |
| dokončení tvaru     |         |                              |                | 42,5                    | 386,8 | 9,1             |
| Celkem:             |         |                              | 24 650         | Celkem:                 |       | 32,1            |

$C_N$  - Cena nástroje, L - Délka dráhy nástroje.

### 3.6.2 Frézování a vyvrtávání

Opracování vnitřního tvaru sestává z frézování Ø 180 mm, Ø 108H9 mm a dna pro Ø 200H8 mm. Zápich Ø 106 mm bude frézován kotoučovou frézou. Na zbylé otvory Ø 100 mm a průměr otvoru Ø 200H8 mm budou použity vyvrtávací tyče. Řezné parametry a strojní čas jednotlivých úseků jsou uvedeny v tab. 16. Výpočty byly zautomatizovány pomocí tabulkového editoru. Pro tyto úseky je navrženo 7 nástrojů – fréza s VBD Ø 66 mm (T1), vyvrtávací tyče (T2, T3, T6, T7), kotoučová fréza s VBD Ø 80 mm (T4), a fréza SK Ø 20 mm (T5).

Strojní čas pro vyvrtávací cyklus  $t_{sp}$ : (3.42)

$$t_{sp} = \frac{L}{v_f} [min]$$

kde: L [mm] délka dráhy nástroje,  
 $v_f$  [mm.min<sup>-1</sup>] rychlost posuvu.

Rychlost posuvu  $v_f$  [13]: (3.43)

$$v_f = f \cdot n = f \cdot \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} [mm.min^{-1}]$$

kde: f [mm] posuv na otáčku,  
 n [min<sup>-1</sup>] otáčky nástroje,  
 $v_c$  [m.min<sup>-1</sup>] řezná rychlost,  
 D [mm] průměr nástroje.

Výpočet strojního času  $t_{sp}$  v úseku dokončování Ø 200 mm: (3.44)

$$t_{sp} = \frac{L}{v_f} = \frac{L}{f \cdot \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D}} = \frac{L \cdot \pi \cdot D}{f \cdot 1000 \cdot v_c} = \frac{150 \cdot \pi \cdot 200}{0,075 \cdot 1000 \cdot 200} = 6,28 \text{ min}$$

Strojní čas pro spirální frézování  $t_{sp}$ : (3.45)

$$t_{sp} = \frac{\pi(D - d_T) \cdot p_{ss}}{v_f} = \frac{\pi(D - d_T) \cdot \frac{h}{s_s}}{v_f} = \frac{\pi h \cdot (D - d_T)}{s_s \cdot v_f} [min]$$

kde: D [mm] průměr obráběného otvoru,  
 $d_T$  [mm] průměr nástroje,  
 $p_{ss}$  [-] počet stoupání spirály,  
 h [mm] hloubka frézování,  
 $s_s$  [mm] stoupání spirály,  
 $v_f$  [mm.min<sup>-1</sup>] rychlost posuvu.

Rychlost posuvu  $v_f$  [13]: (3.46)

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d_T} [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$$

kde:  $f_z$  [mm] posuv na zub,  
 $z$  [-] počet zubů frézy.

Výpočet strojního času  $t_{sp}$  v úseku frézování Ø 180 mm: (3.47)

$$t_{sp} = \frac{\pi h(D - d_T)}{s_s \cdot v_f} = \frac{\pi h(D - d_T)}{s_s \cdot f_z \cdot z \cdot \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d}} = \frac{\pi^2 d_T h(D - d_T)}{s_s \cdot f_z \cdot z \cdot 1000 \cdot v_c} [\text{min}]$$

$$t_{sp} = \frac{\pi^2 \cdot 63 \cdot h \cdot (180 - 63)}{2,5 \cdot 0,084 \cdot 6 \cdot 1000 \cdot 160} = 4,69 \text{ min}$$

Z tab. 15 a tab. 16 plyne výhoda opracování vnitřního tvaru soustružením a to jednak z pohledu úspory kusového strojního času (úspora 6,1 min), ale také z pohledu počtu potřebných nástrojů (3 soustružnické nože oproti 3 frézovacím a 4 vyvrtávacím), tj. kratších seřizovacích časů a nižších pořizovacích nákladů.

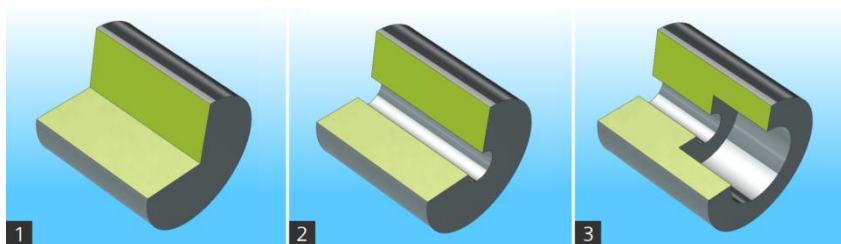
Tab. 16 Náklady spojené s opracováním vnitřního tvaru frézováním a vyvrtáváním.

| Úsek              | Nástroj |                      | $C_N$   | $v_f$                   | $L$     | $t_{AS}$ |
|-------------------|---------|----------------------|---------|-------------------------|---------|----------|
|                   |         |                      | [Kč]    | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [mm]    | [min]    |
| Fr. dna pro Ø 200 | T1      | Fréza Ø 66           | 9 850   | 404,4                   | 1 617,6 | 4,0      |
| Frézování Ø 180   |         |                      |         |                         | 2 830,0 | 7,0      |
| Hrubování Ø 108   |         |                      |         |                         | 202,2   | 0,5      |
| Hrubování Ø 200   | T2      | Vyvrtávací tyč Ø 200 | 22 140  | 23,9                    | 150,6   | 6,3      |
| Hrubování Ø 100   | T3      | Vyvrtávací tyč Ø 100 | 19 250  | 47,8                    | 172,1   | 3,6      |
| Frézování Ø 106   | T4      | Kotoučová fréza Ø 80 | 8 825   | 179,1                   | 1 558,2 | 8,7      |
| Dokončování Ø 108 | T5      | Fréza SK Ø 20        | 3 200   | 155,3                   | 124,2   | 0,8      |
| Dokončování Ø 100 | T6      | Vyvrtávací tyč Ø 100 | 19 250  | 47,8                    | 50      | 1,0      |
| Dokončování Ø 200 | T7      | Vyvrtávací tyč Ø 200 | 22 140  | 23,9                    | 150,6   | 6,3      |
| Celkem:           |         |                      | 104 655 | Celkem:                 |         | 38,2     |

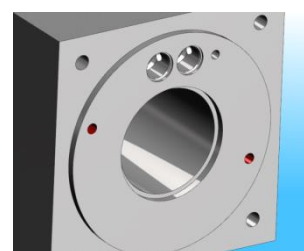
$C_N$  - Cena nástroje;  $L$  - Délka dráhy nástroje.

### 3.7 Varianta 1 - 3: výkovek kruhového průřezu

V případě těchto variant je polotovarem válec  $\varnothing 345 \times 342$  mm (obr. 24, varianta 1), válec s předvrtanou dírou  $\varnothing 94$  mm (varianta 2), příp. válec s předvrtanou dírou  $\varnothing 94$  mm a  $\varnothing 194$  mm (varianta 3). Pracovní postup (tab. 17) je navržen na tři upnutí – první a druhé v univerzálním sklíčidle, třetí na speciální přípravek, pro který je nutné vyvrtat dva technologické otvory pro kolíky (zajištění polohy, obr. 25). Vnitřní tvar bude zhotoven soustružením. Během prvního upnutí v univerzálním sklíčidle bude zarovnáno čelo a soustružena část vnitřního tvaru ze strany s  $\varnothing 200H8$  mm. Druhé upnutí v univerzálním sklíčidle zajistí zarovnání čela, dokončení vnitřního tvaru soustružením a vrtání otvorů (propojovací otvory z čela i otvory technologické pro upnutí na přípravek). Třetí upnutí je realizováno za pomoci přípravku speciální konstrukce, polohováním na kolíky podle technologických otvorů a dotažením šroubem shora (obr. 26).



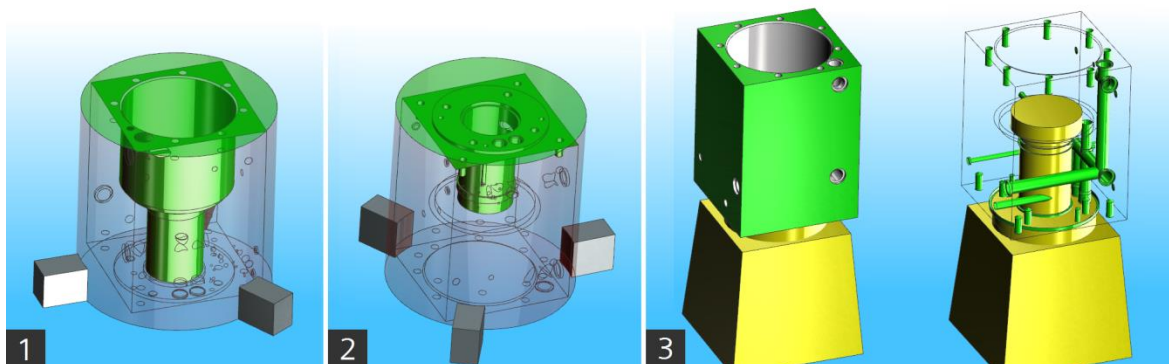
Obr. 24 Polotovary – varianta 1 – 3: 1) válec  $\varnothing 345 \times 342$  mm, 2) válec s předvrtanou dírou  $\varnothing 94$  mm, 3) válec s předvrtanou dírou  $\varnothing 94$  mm a  $\varnothing 194$  mm.



Obr. 25 Technologické otvory.

Tab. 17 Varianta 1 – 3: návrh pracovního postupu.

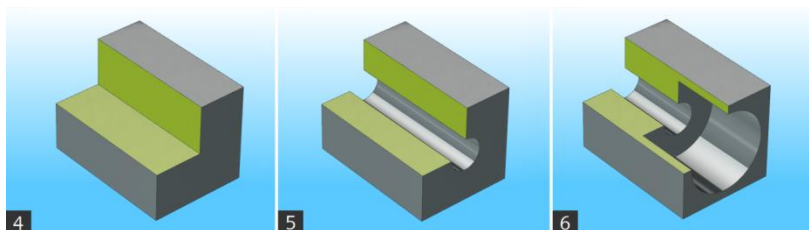
|   |  |   |
|---|--|---|
| 1 | Upnout do univerzálního sklíčidla za $\varnothing 345$ mm.   | Zarovnat čelo, vrtat průchozí otvor $\varnothing 90$ mm (pouze varianta 1), soustružit vnitřní vrtání ze strany $\varnothing 200H8$ mm hotově.<br>Soustružit vnější průměr $\varnothing 345$ mm v délce 200 mm s minimálním úběrem pro upnutí ve 2. poloze. |
| 2 | Upnout za vnější průměr do univerzálního sklíčidla, středit. | Zarovnat čelo, soustružit vnitřní vrtání hotově.<br>Vrtat díry a technologické otvory z čela pro následující upnutí.  |
| 3 | Upnout na přípravek, polohovat.                              | Frézovat vnější tvar, vrtat, řezat závity hotově.   |



Obr. 26 Návrh upnutí pro varianty 1 – 3: 1) a 2) upnutí do sklíčidla za vnější průměr, 3) upnutí na přípravek.

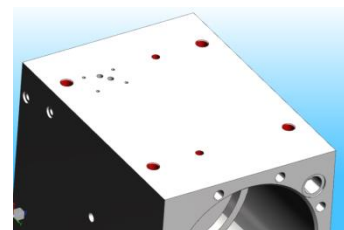
### 3.8 Varianta 4 - 6: výkovek čtvercového průřezu

Polotovarem je kvádr 246 x 246 x 342 mm (obr. 27, varianta 4), kvádr s předvrtanou dírou Ø 94 mm (varianta. 5), příp. kvádr s předvrtanou dírou Ø 94 mm a Ø 194 mm (varianta 6). Pracovní postup (tab. 18) je navržen na dvě upnutí – první do strojního svěráku a druhé na speciální přípravek (obr. 29), pro který je nutné vyvrtat technologické otvory (obr. 28) pro šrouby (upnutí) a kolíky (zajištění polohy). Vnitřní tvar bude zhotoven frézováním a vyvrtáváním. Během prvního upnutí ve svěráku bude opracována jedna strana s technologickými a propojovacími otvory hotově. Ve druhém upnutí bude součást dokončena.



Obr. 27 Polotovár – varianta 4 – 6:

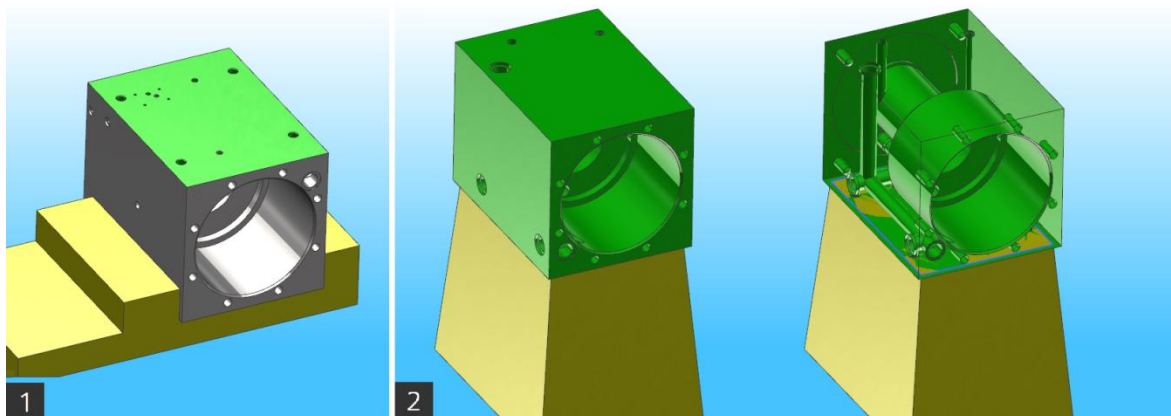
4) kvádr 246 x 246 x 342 mm, 5) kvádr s předvrtanou dírou Ø 94 mm, 6) kvádr s předvrtanou dírou Ø 94 mm a Ø 194 mm.



Obr. 28 Technologické otvory.

Tab. 18 Varianta 4 – 6: návrh pracovního postupu.

|   |  |  |
|---|--|--|
| 1 | Upnout do svěráku za L = 246 mm, dírou Ø 200 mm k obsluze. | Frézovat horní plochu, srazit hrany, vrtat, vystružit technologické otvory, řezat závit, hotově. |
| 2 | Upnout na přípravek, dírou Ø 200 mm k obsluze.             | Frézovat, vrtat hotově dle výkresu.  |



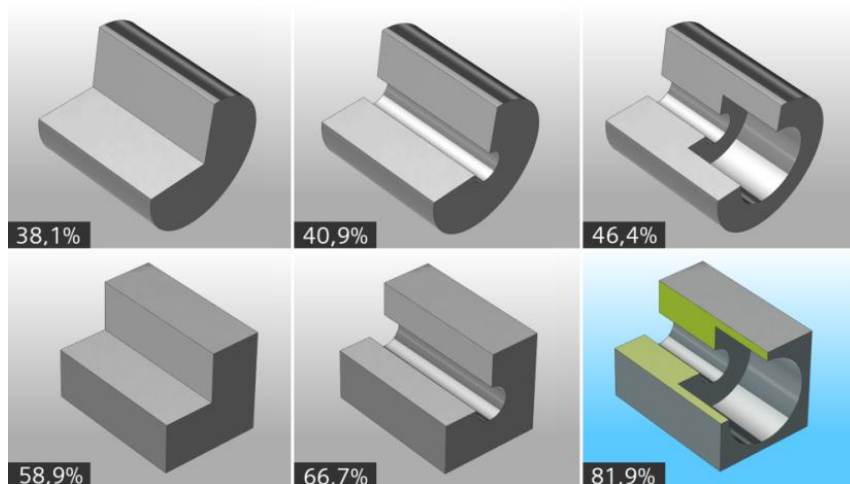
Obr. 29 Návrh upnutí pro varianty 4 – 6: 1) upnutí do strojního svěráku, 2) upnutí na přípravek.

### 3.9 Porovnání variant, vyhodnocení

Využití dodavatelem předhrubovaného polotovaru je výhodné jednak z hlediska úspory celkových nákladů na výchozí materiál, ale také z hlediska opotřebení stroje (eliminace těžkého hrubování). Při snaze o zachování jeho uspokojivé zůstatkové hodnoty a dosahované výrobní přesnosti pro náročnější aplikace (5osé souvislé obrábění), by bylo nezbytné zařazení další hrubovací operace na jiném pracovišti a operace tepelného zpracování pro odstranění zbytkové napjatosti materiálu.

Ačkoliv z porovnání strojních časů a nákladů na nástroje v podkapitole 3.6 vyplývá výhoda soustružení vnitřního vrtání, nevýhodou je zejména velice komplikovaný odvod třísek, vyšší počet nezbytných pracovních poloh (s počtem úměrně roste vnesená nepřesnost), i bezpečnostní rizika spojená s počtem dosahovaných otáček stolu blízkých maximální hodnotě ( $n = 778,1 \text{ min}^{-1}$ ) při vrtání  $\varnothing 90 \text{ mm}$  a soustružení  $\varnothing 100 \text{ mm}$  (vystředění obrobku, vyvažování stolu, apod.).

Požadavek na nejnižší pracnost v kombinaci s nízkými výrobními náklady splňuje varianta 6 (obr. 30), která je základem pro vypracování technologického postupu. V tab. 19 jsou zaneseny poznatky z analýzy předchozích kapitol, orientované na roční sérii 100 ks výrobků. Přípravný čas, spojený s upínáním, je uvažován 35 min na jednu upínací polohu (demontáž osazených přípravků ze stolu, montáž požadovaného přípravku, zajištění polohy obrobku, příp. vyvažování stolu) a 3 min na seřízení jednoho nástroje (vložení do zásobníku, úprava korekcí v seznamu nástrojů).



Obr. 30 stupeň využití výchozího polotovaru dle varianty.

Předběžné náklady pro na 1 výrobek  $N_{ks}$  pro porovnání uvažovaných variant: (3.48)

$$N_{ks} = \frac{(N_A + N_C + N_E + N_F) \cdot 100 + N_D}{100}$$

kde:  $N_A$  [Kč] náklady na polotovar,  
 $N_C$  [Kč] náklady na strojní čas opracování vnitřního tvaru,  
 $N_D$  [Kč] náklady na nástroje,  
 $N_E$  [Kč] náklady na upínání,  
 $N_F$  [Kč] náklady na seřízení nástrojů.

Tab. 19 Vyčíslení výrobních nákladů dle varianty v Kč.

| Varianta                   | 1      | 2      | 3      | 4       | 5      | 6      |
|----------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| $N_A$                      | 46 825 | 47 996 | 48 188 | 29 287  | 30 461 | 30 650 |
| $N_B$                      | 1 850  |        |        |         |        |        |
| $N_C$                      | 990    |        |        | 1 178   |        |        |
| $N_D$                      | 24 650 |        |        | 104 655 |        |        |
| $P_U$                      | 3      |        |        | 2       |        |        |
| $P_N$                      | 3      |        |        | 7       |        |        |
| $N_E$                      | 3 238  |        |        | 2 158   |        |        |
| $N_F$                      | 278    |        |        | 648     |        |        |
| Náklady na 1 ks $N_{KS}$ : | 51 578 | 52 749 | 52 941 | 34 318  | 35 492 | 35 681 |

$N_A$  - náklady na polotovary;  $N_B$  - hodinová sazba stroje;  $N_C$  - náklady na strojní čas opracování vnitřního tvaru;  $N_D$  - náklady na nástroje;  $N_E$  - náklady na upínání;  $N_F$  - náklady na seřízení nástrojů;  $P_U$  - počet upínání;  $P_N$  - počet nástrojů.

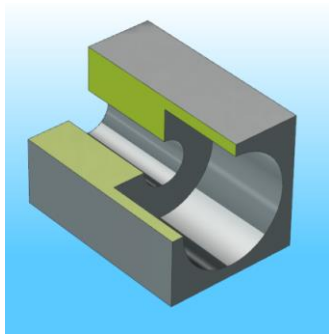
Opodstatnění volby dodavatelem předhrubovaného výkovku 246 x 246 x 342 s přídávky 3 mm na plochu (varianta 6), frézování a vyvrtávání vnitřního tvaru a využití dvou upínacích poloh pomocí strojního svěráku a přípravku:

- nejvyšší stupeň využití výchozího polotovaru - 81,9 %, tzn. nejnižší procento odpadu; z tohoto pohledu je tedy nejehospodárnější a nejšetrnější k životnímu prostředí,
- eliminace neefektivních hrubovacích operací - snížení nároků na výkon stroje, snížení opotřebení stroje, tj. dosažení jeho vyšší životnosti, příp. vyšší zůstatkové hodnoty, eliminace nezanedbatelného vlivu zbytkové napjatosti materiálu a tedy nutného zařazení tepelného zpracování k jeho odstranění,
- i přes vyšší náklady na strojní čas a pořízení nástrojů při frézování a vyvrtávání vnitřního tvaru je toto řešení výhodnější z hlediska větší stability upnutí, lepšího odvodu třísek, snížení pracnosti v souvislosti s počtem upínacích poloh (2 oproti 3) a větší bezpečnosti (při vrtání a soustružení by stůl dosahoval vysokých otáček),
- nejnižší pracnost v kombinaci s přijatelnými výrobními náklady.

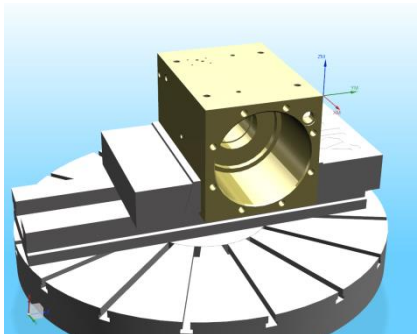


## 4 ZVOLENÁ STRATEGIE

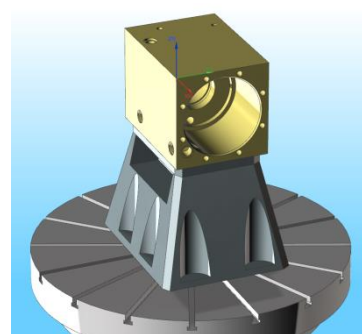
Polotovarem je kvádr 246 x 246 x 342 mm s předvrtanou dírou Ø 94 mm a Ø 194 mm (obr. 31). Technologický postup je rozdělen do 5 operací (tab. 20). Předběžnou analýzou nebyl zaznamenán technicky neřešitelný problém - podařilo se tak dodržet požadavek opracování dílce na jednom pracovišti (operace 20). Tento nejdůležitější výrobní úsek bude realizován ve dvou ustaveních (obr. 32 a obr. 33), pracovní postup je uveden v tab. 21.



Obr. 31 Polotovarek.



Obr. 32 Upnutí - poloha 1.



Obr. 33 Upnutí - poloha 2.

### 4.1 Technologický postup

Po příjmu materiálu následuje vstupní kontrola, evidence a naskladnění (operace 10). Výchozí polotovarek pokračuje na stroj DMU, kde dojde k obrobení hotově (operace 20). Zámečnická dílna zajistí odjehlení válce (operace 30) pro potřeby kontroly (operace 40). Na závěr je výrobek zaevidován a naskladněn (operace 50).

Tab. 20 Technologický postup rámcový.

| Č. op. | Pracoviště            | Popis práce  |
|--------|-----------------------|--|
| 10     | Vstupní kontrola.     | Rozměrová a vizuální kontrola, přenesení atestu materiálu do průvodky.                               |
| 20     | Frézování.            | Výroba součásti dle výkresu hotově.  |
| 30     | Zámečnické práce.     | Odjehlí po obrábění a celý kus upravit. Vyrazit označení dle výkresu. Očistit a lehce nakonzervovat. |
| 40     | Měření 3D přístrojem. | Konečná kontrola včetně kontroly vizuální a ověření jakosti materiálu.                               |
| 50     | Sklad.                | Hotový dílec převést do meziskladu vyráběných dílů.  |

Tab. 21 Pracovní postup v operaci 20.

| Ustavení | Pracovní postup  |                                       |
|----------|--|---------------------------------------|
| 01       | Upnout do svěráku UP3420, frézovat 1 plochu.<br>- vrtat technologické otvory 4xM16 a 2x kolík Ø10H7<br>- vrtat otvory dle detailu "X" 2x Ø7, 4x M5 |                                       |
| 02       | Upnout na přípravek UP3421, frézovat 5 ploch na rozměr 240 x 240 x 336 mm<br>Frézovat, vrtat, zahloubit, řezat závit:                              |                                       |
|          | Ø 200H8 / ø 180 / ø 108H9 / ø 100 / Ø 106  | 2x Ø 20 / Ø 22 / Ø 22H8 / Ø 24 / Ø 28 |
|          | 3x Ø pro G3/4" / G3/4" / Ø 30  | 4x M16                                |
|          | 1x Ø 11 / 1 x Ø 15   | 4x Ø pro G1/8" / G1/8"                |
|          | 8x M16 (na čele)   | Ø 210                                 |

## 4.2 Upínání

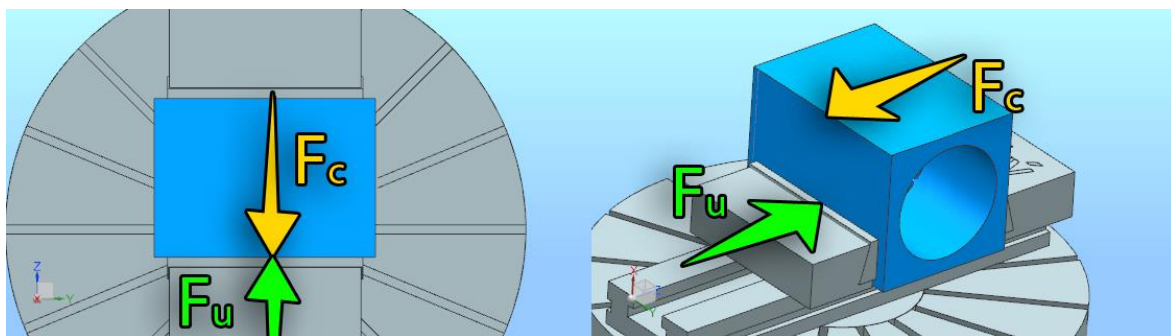
Každé tuhé těleso má v prostoru šest stupňů volnosti. Cílem upnutí je zajistit správnou polohu a stabilní ustavení součásti jejich vymezením, což zaručí dodržení předepsaných rozměrových hodnot a tolerancí. Opracování je závislé na určitých plochách, které mají vztah k obráběné ploše. Při určování sledu operací je třeba vycházet od plochy, která se nazývá ustavovací (výchozí) základna obrábění. Touto plochou je pak určena poloha obrobku vzhledem k řeznému nástroji [11,15].

Při upínání je nutno dodržet následující podmínky [11]:

- při upínání nesmí dojít ke změně polohy ustaveného obrobku působením upínacích sil,
- upínací síly nutno volit tak velké, aby působením řezných sil při obrábění nebyl obrobek posunut z původní polohy a aby nenastalo chvění obrobku,
- pro upnutí obrobku je potřeba použít rychloupínacích prvků, aby upínací čas byl minimální,
- působíště, směr a velikost upínacích sil musí být navrženy s ohledem na působíště, směr a velikost řezných odporů.

### 4.2.1 Výpočet upínací síly v 1. ustavení

Velikost řezné síly při hrubování čelní plochy byla stanovena v kapitole 3.3.1. Za předpokladu působení řezné síly proti síle upínací, je možné ji stanovit ze vztahu (4.1).



Obr. 34 Upnutí – 1. poloha. Sípký se silama

Výpočet upínací síly  $F_u$  [11]:

(4.1)

$$F_u - k_b \cdot F_c = 0$$

$$F_u = k_b \cdot F_c$$

$$F_u = 3 \cdot 1\,146,1 = 3\,438,3 \text{ N}$$

kde:  $k_b$  [-] koeficient bezpečnosti při hrubování  $k_b = 3$ ,  
 $F_c$  [N] řezná síla.

#### 4.2.2 Výpočet upínací síly v 2. ustavení

Pro ustavení na speciální přípravek byly předběžně navrženy čtyři šrouby M16 a dva kolíky Ø 10H7 pro zajištění přesné polohy. Tento návrh je třeba ověřit početně.

Výpočet upínací síly  $F_u$  [11]: (4.2)

$$k_b \cdot F_c = F_u \cdot f_t$$

$$F_u = \frac{k_b \cdot F_c}{f_t} = \frac{3 \cdot 1\,146,1}{0,14} = 24\,559,3\,N$$

kde:  $k_b$  [-] koeficient bezpečnosti při hrubování  $k_b = 3$ ,  
 $F_c$  [N] řezná síla,  
 $f_t$  [-] součinitel smykového tření  $f_t = 0,14$ .

Pevnostní rovnice pro namáhání ve střihu  $\tau_s$  [12]: (4.3)

$$\tau_s = \frac{k_b \cdot F_c}{n_s \cdot S} \leq \tau_{Ds} [MPa]$$

kde:  $n_s$  [-] počet šroubů,  
 $S$  [mm<sup>2</sup>] střižný průřez,  
 $\tau_{Ds}$  [MPa] dovolené namáhání ve střihu.

Zvolenému materiálu šroubu ČSN 11 700 odpovídá dovolené namáhání ve střihu pro střídavé namáhání minimální hodnota  $\tau_{Ds} = 60$  MPa. Ze vztahu (4.4) plyne, že šrouby zvolené pro upnutí vyhovují [12].

Kontrola šroubů na střih  $\tau_s$  [12]: (4.4)

$$\tau_s = \frac{k_b \cdot F_c}{n_s \cdot \frac{\pi \cdot d_3^2}{4}} = \frac{4 \cdot k_b \cdot F_c}{n_s \cdot \pi \cdot d_3^2} = \frac{4 \cdot 3 \cdot 1\,146,1}{4 \cdot \pi \cdot 13,546^2} = 4,64 \leq 60\,MPa$$

kde:  $d_3$  [mm] malý průměr závitu.

### 4.3 Nástroje

Při volbě řezných podmínek je, kromě hodnot doporučených výrobcem nástrojů, nutné brát ohled na podmínky obrábění. Ty lze rozdělit mezi dobré, průměrné a obtížné z pohledu:

- způsobu, tuhosti a stability upnutí obrobku,
- vyložení nástroje,
- možností chlazení a odvodu třísek,
- charakter řezu (přerušovaný nebo plynulý řez, sousledné a nesousledné frézování),
- stavu polotovaru a jeho povrchové vrstvy apod.

Navržené řezné podmínky je třeba experimentálně ověřit a případně optimalizovat v závislosti na chování celé soustavy stroj – nástroj – obrobek (tvorba a tvar třísky, vibrace, opotřebení, apod.) pro zachování přijatelné ekonomiky procesu. Vybrané nástroje jsou podle použití zobrazeny na obr. 35 až obr. 42, k nim přiřazené řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 22 až tab. 27. Celkový souhrn použitých nástrojů je uveden v tab. 28.

Pro výpočet řezných parametrů byly použity následující vzorce (4.5) až (4.9).

Výpočet řezné rychlosti  $v_c$  [13]: (4.5)

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$$

Výpočet otáček  $n$  [13]: (4.6)

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D}$$

Výpočet posuvové rychlosti  $v_f$  [13]: (4.7)

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n$$

Výpočet posuvu na otáčku  $f$  [13]: (4.8)

$$f = \frac{v_f}{n}$$

Výpočet posuvu na zub  $f_z$  [13]: (4.9)

$$f_z = \frac{v_f}{z \cdot n}$$

|      |       |                      |   |
|------|-------|----------------------|---|
| kde: | D     | [mm]                 | průměr nástroje, příp. obráběný průměr, |
|      | n     | [min <sup>-1</sup> ] | otáčky vřetene,                         |
|      | $f_z$ | [mm]                 | posuv na zub,                           |
|      | z     | [-]                  | počet zubů nástroje.                    |

### Frézování rovinných ploch

Pro hrubování byla zvolena čelní fréza Ø 63 mm (obr. 35) s VBD ze SK se 6 zuby a vnitřním chlazením, označení 100\_D63\_L110L140\_VBD. Řezné parametry jsou uvedeny v tab. 22.

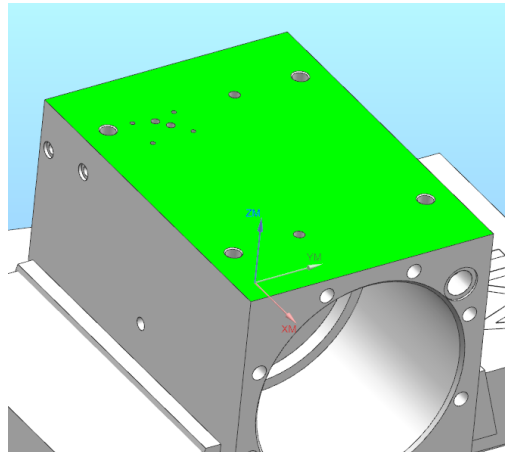
Pro dokončování byla zvolena čelní fréza Ø 100 mm (obr. 36) mm s VBD ze SK se 7 zuby. Jedno lůžko bude osazené hladicí VBD pro zajištění bezvadné drsnosti povrchu. Označení nástroje: 140\_D100\_L110\_VBD. Řezné parametry jsou uvedeny v tab. 23.



Obr. 35 Hrubovací čelní fréza Ø 63 mm.



Obr. 36 Dokončovací čelní fréza Ø 100 mm.



Obr. 37 Rovinná plocha – 1. upnutí.

### Vrtání D14 pro M16, sražení pro M16, řezání M16

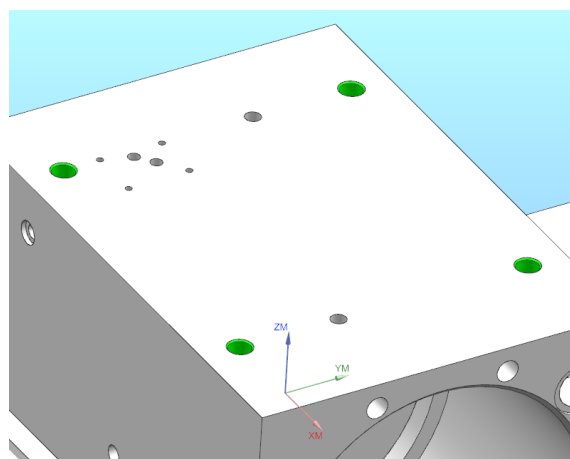
Pro vrtání byl zvolen šroubovítý vrták Ø 14 mm ze SK s vnitřním chlazením, označen 200\_D14\_L70L182\_SK (obr. 38), pro řezání závitu M16 závitník z rychlořezné oceli s povlakem (HSS-E; obr. 39), označen 240\_M16\_L32L168\_HSSE. Řezné parametry uvedeny v tab. 24 a tab. 25.



Obr. 38 Vrták SK Ø 14 mm.



Obr. 39 Závitník M16.



Obr. 40 Díry se závity M16.

### Navrtání, vrtání D7

Pro navrtávací a srážení operace byl zvolen navrtávací vrták Ø 16 mm s vyměnitelnou korunkou ze SK (obr. 41), označen 220\_D16\_L50L190\_MM. Řezné podmínky v tab. 26.

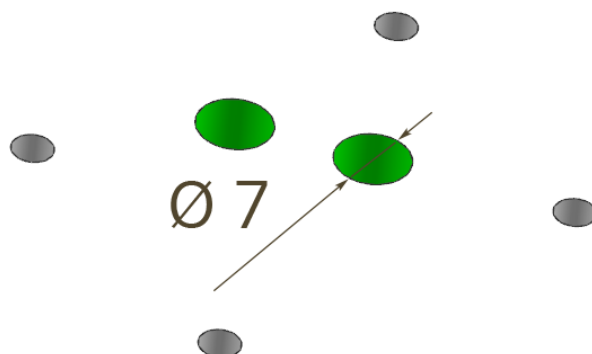
Pro vrtání byl zvolen vrták Ø 16 mm ze SK s vnitřním chlazením (obr. 42), označen 200\_D7\_L61L191\_SK. Řezné podmínky v tab. 27.



Obr. 41 Navrtávací vrták Ø 16 mm.



Obr. 42 Vrták SK Ø 7 mm.



Obr. 43 Díry D7 mm.

Tab. 22 Parametry nástroje 100\_D63\_L110L140\_VBD.

| D    | z   | a <sub>p</sub> | a <sub>e</sub> | v <sub>c</sub>         | n                    | f <sub>z</sub> | v <sub>f</sub>          | chlazení |
|------|-----|----------------|----------------|------------------------|----------------------|----------------|-------------------------|----------|
| [mm] | [-] | [mm]           | [mm]           | [m.min <sup>-1</sup> ] | [min <sup>-1</sup> ] | [mm]           | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [-]      |
| 63   | 6   | 2              | 47             | 300                    | 1 515                | 0,2            | 1 819                   | vnitřní  |

Tab. 23 Parametry nástroje 140\_D100\_L110\_VBD.

| D    | z   | a <sub>p</sub> | a <sub>e</sub> | v <sub>c</sub>         | n                    | f <sub>z</sub> | v <sub>f</sub>          | chlazení |
|------|-----|----------------|----------------|------------------------|----------------------|----------------|-------------------------|----------|
| [mm] | [-] | [mm]           | [mm]           | [m.min <sup>-1</sup> ] | [min <sup>-1</sup> ] | [mm]           | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [-]      |
| 100  | 7   | 0,15           | 80             | 471                    | 1 500                | 0,19           | 2 000                   | vnitřní  |

Tab. 24 Parametry nástroje 200\_D14\_L70L182\_SK.

| D    | z   | a <sub>p</sub> | a <sub>e</sub> | v <sub>c</sub>         | n                    | f    | v <sub>f</sub>          | chlazení |
|------|-----|----------------|----------------|------------------------|----------------------|------|-------------------------|----------|
| [mm] | [-] | [mm]           | [mm]           | [m.min <sup>-1</sup> ] | [min <sup>-1</sup> ] | [mm] | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [-]      |
| 14   | 2   | -              | -              | 65                     | 1 478                | 0,15 | 221,7                   | vnitřní  |

Tab. 25 Parametry nástroje 240\_M16\_L32L168\_HSSE.

| D    | z   | a <sub>p</sub> | a <sub>e</sub> | v <sub>c</sub>         | n                    | f    | v <sub>f</sub>          | chlazení |
|------|-----|----------------|----------------|------------------------|----------------------|------|-------------------------|----------|
| [mm] | [-] | [mm]           | [mm]           | [m.min <sup>-1</sup> ] | [min <sup>-1</sup> ] | [mm] | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [-]      |
| 16   | 3   | -              | -              | 8                      | 159                  | 2    | 318                     | vnější   |

Tab. 26 Parametry nástroje 220\_D16\_L50L190\_MM.

| D    | z   | a <sub>p</sub> | a <sub>e</sub> | v <sub>c</sub>         | n                    | f <sub>z</sub> | v <sub>f</sub>          | chlazení |
|------|-----|----------------|----------------|------------------------|----------------------|----------------|-------------------------|----------|
| [mm] | [-] | [mm]           | [mm]           | [m.min <sup>-1</sup> ] | [min <sup>-1</sup> ] | [mm]           | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [-]      |
| 16   | 2   | -              | -              | 150                    | 3 000                | 0,1            | 300                     | vnější   |

Tab. 27 Parametry nástroje 200\_D7\_L61L191\_SK.

| D    | z   | a <sub>p</sub> | a <sub>e</sub> | v <sub>c</sub>         | n                    | f    | v <sub>f</sub>          | chlazení |
|------|-----|----------------|----------------|------------------------|----------------------|------|-------------------------|----------|
| [mm] | [-] | [mm]           | [mm]           | [m.min <sup>-1</sup> ] | [min <sup>-1</sup> ] | [mm] | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [-]      |
| 7    | 2   | -              | -              | 65                     | 2 956                | 0,15 | 443,4                   | vnitřní  |



Odměrování nástrojů bude realizováno mimo obráběcí stroj na specializovaném pracovišti přípravy nástrojových sestav. Ty mají konkrétní parametry celkové délky a vyložení nástroje (pro zajištění bezkolizního stavu) určené programátorem stroje a jejich příprava je řízena plánováním výroby. Tímto způsobem je docíleno výrazného snížení přípravných časů. Vybrané nástroje a upínače jsou zobrazeny na obr. 44 až obr. 51, jejich uložení na obr. 52.



Obr. 44 Vrták  
SK Ø 14 mm.



Obr. 45 Rohová fréza  
Ø 66 mm.



Obr. 46 Vyvrtávací tyč  
Ø 200 mm.



Obr. 47 Čelní fréza  
Ø 100 mm.



Obr. 48  
Hydraulický upínač.



Obr. 49  
Tepelný upínač.



Obr. 50  
Upínač pro kleštinu.



Obr. 51  
Redukce C5 – HSK63.



Obr. 52 Stojan s nástroji.

Pro výrobu je zapotřebí 32 nástrojů (viz tab. 28). Celková cena na jejich pořízení činí 202 055 Kč.

Tab. 28 Seznam nástrojů.

| Prvek součásti  | Úsek              | Nástroj               | Chlazení | Cena [Kč] |
|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|-----------|
| Sražení         | Navrtání, sražení | Navrtávací vrták Ø 16 | Vnější   | 6 000     |
| Rovinné plochy  | Hrubování         | Fréza Ø 63            | Vnitřní  | 8 000     |
|                 | Dokončování       | Fréza Ø 100           | Vnitřní  | 9 500     |
| Závity M16      | Vrtání            | Vrták Ø 14            | Vnitřní  | 3 000     |
|                 | Řezání            | Závitník M16          | Pasta    | 1 750     |
| Otvor Ø 10H7    | Vrtání            | Vrták Ø 9,8           | Vnitřní  | 2 800     |
|                 | Vystružování      | Výstružník Ø 10H7     | Vnitřní  | 4 200     |
| Otvor Ø 7       | Vrtání            | Vrták Ø 7             | Vnitřní  | 2 950     |
| Závity M5       | Vrtání            | Vrták Ø 4,2           | Vnitřní  | 3 100     |
|                 | Řezání            | Závitník M5           | Pasta    | 1 200     |
| Otvor Ø 200H8   | Hrubování         | Vyvtávací tyč Ø 200   | Vnitřní  | 22 140    |
|                 | Dokončování       | Vyvtávací tyč Ø 200   | Vnitřní  | 22 140    |
|                 | Frézování dna     | Fréza Ø 66            | Vnitřní  | 9 850     |
| Otvor Ø 180     | Frézování         | Fréza Ø 66            | Vnitřní  | -         |
| Otvor Ø 108H9   | Hrubování         | Fréza Ø 66            | Vnitřní  | -         |
|                 | Dokončování       | Fréza Ø 20            | Vnější   | 3 200     |
| Otvor Ø 100     | Hrubování         | Vyvtávací tyč Ø 100   | Vnitřní  | 19 250    |
|                 | Dokončování       | Vyvtávací tyč Ø 100   | Vnitřní  | 19 250    |
| Zápich Ø 106    | Frézování         | Kotoučová fréza Ø 80  | Vnitřní  | 8 825     |
| Závity G3/4     | Vrtání pilot      | Vrták Ø 24,5 krátký   | Vnitřní  | 3 500     |
|                 | Vrtání dlouhé     | Vrták Ø 24,5 dlouhý   | Vnitřní  | 4 250     |
|                 | Řezání            | Závitník G3/4         | Pasta    | 3 200     |
| Závity G1/8     | Vrtání pilot      | Vrták Ø 8,8 krátký    | Vnitřní  | 3 100     |
|                 | Vrtání dlouhé     | Vrták Ø 8,8 dlouhý    | Vnitřní  | 7 200     |
|                 | Řezání            | Závitník G1/8         | Pasta    | 1 500     |
| Čep Ø 210       | Hrubování         | Fréza Ø 66 rohová     | Vnitřní  | 8 250     |
|                 | Dokončování       | Fréza Ø 11            | Vnější   | 2 600     |
| Zahloubení Ø 30 | Frézování         | Fréza Ø 11            | Vnější   | -         |
| Otvor Ø 11      | Vrtání            | Vrták Ø 11            | Vnitřní  | 3 000     |
| Otvor Ø 15      | Vrtání            | Vrták Ø 15            | Vnitřní  | 2 800     |
| Otvor Ø 20      | Vrtání            | Vrták Ø 20            | Vnitřní  | 2 750     |
| Otvor Ø 22H8    | Vrtání            | Vrták Ø 21,8          | Vnitřní  | 2 750     |
|                 | Vystružování      | Výstružník Ø 22H8     | Vnitřní  | 4 250     |
| Otvor Ø 24      | Vrtání            | Vrták Ø 24            | Vnitřní  | 2 750     |
| Otvor Ø 28      | Vrtání            | Vrták Ø 28            | Vnitřní  | 3 000     |
| Celkem:         |                   |                       |          | 202 055   |

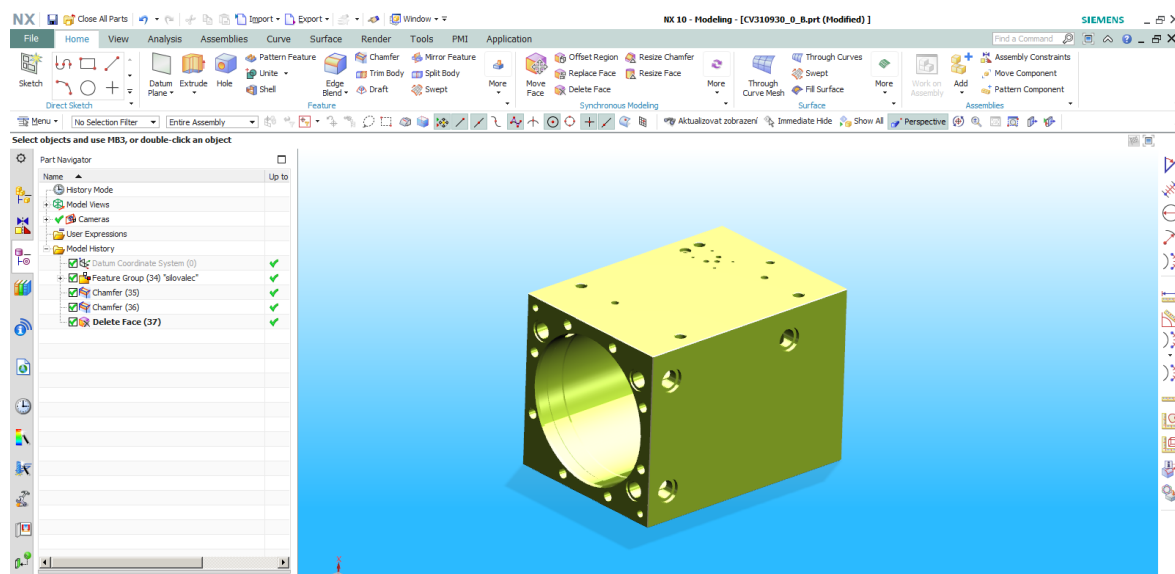


## 5 TVORBA NC PROGRAMU

Technologický postup, opírající se o nasazení moderních CNC obráběcích strojů ve výrobním procesu úzce souvisí s kvalitou zpracování vstupních informací a je tak nezanedbatelně ovlivněn mj. úrovní počítačové podpory. Únosná doba návratnosti investice do informačních systémů a produktivních softwarů je zaručena výrazným rozšířením technologických a výrobních možností při současném zkrácení technologické přípravy výroby. Pochopení významu CAD/CAM systémů a jejich nasazení nepopíratelně zvyšuje konkurenční výhodu. Kromě jiného tyto systémy umožňují kontrolu a řízení toku dat a materiálu, optimalizaci obráběcího procesu, standardizaci, automatizaci a redukci stereotypní práce, snížení vlivů lidského faktoru – chybovosti apod., tzn. zvýšení efektivity procesu přípravy výroby.

### 5.1 Prostředí NX10

Siemens NX10 lze zařadit do pokročilých CAD/CAM systémů nabízejících široké možnosti z pohledu vizualizace (obr. 53), tvorby, úpravy a analýzy geometrie a sestav (obr. 54), tvorby, verifikace a optimalizace NC programu, apod.



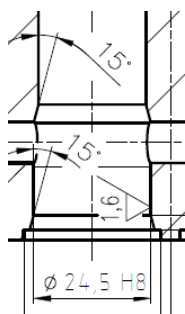
Obr. 53 Válec v prostředí NX10.



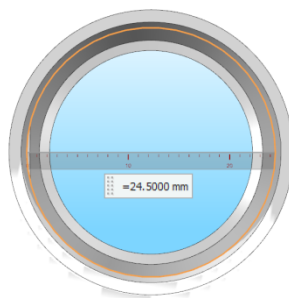
Obr. 54 Část sestavy turbíny v NX10.

## 5.2 Kontrola 3D geometrie

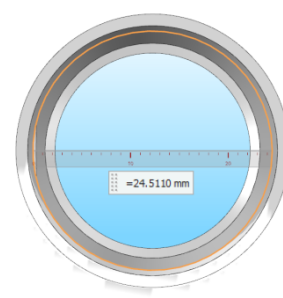
NC programy jsou zpracovávány zpravidla na střední hodnoty předepsaných tolerancí. 3D geometrie, dodávaná oddělením konstrukce je naopak velmi často vytvářena na jmenovité rozměry. Díra  $\varnothing 24,5H8$  mm ( $\varnothing 24,5^{+0,021}_0$  mm) je tak ve skutečnosti  $\varnothing 24,5$  mm namísto  $\varnothing 24,511$  mm, apod., proto musí následovat úprava těchto rozměrů.



Obr. 55 Jmenovitý rozměr na výkrese.



Obr. 56 Průměr díry ze zdrojové geometrie.

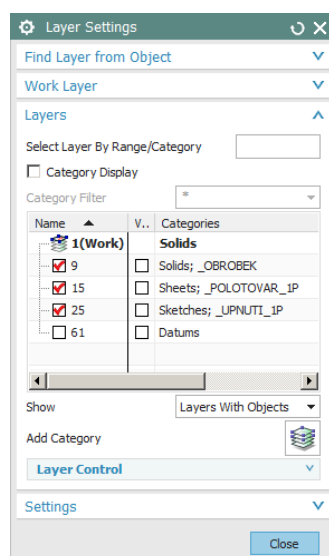


Obr. 57 Upravený průměr díry pro obrábění.

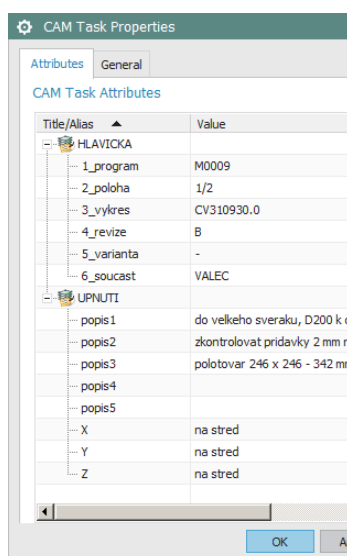
## 5.3 Nastavení prostředí obrábění

Pro efektivní práci při tvorbě NC programu je vhodné přizpůsobit prostředí obrábění konkrétního stroje vytvořením:

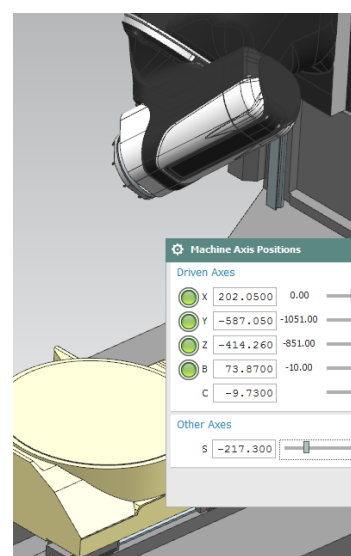
- kinematiky stroje pro verifikaci programu,
- nástrojové databáze včetně 3D geometrie,
- šablon obráběcích strategií a metod (řezné podmínky, přídavky apod.),
- výchozích hladin pro práci s geometrií (polotovary, upínky apod.),
- výchozích pohledů pro tvorbu výrobní dokumentace a šablony výrobní dokumentace (nástrojový a seřizovací list),
- výchozích parametrů, generovaných v programu (informace v hlavičce apod.).



Obr. 58 Nastavení hladin.



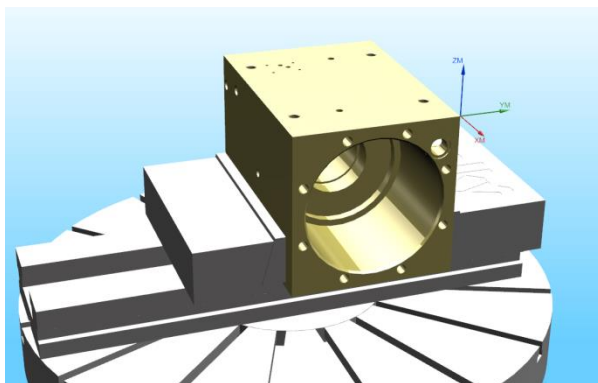
Obr. 59 Nastavení volitelných parametrů.



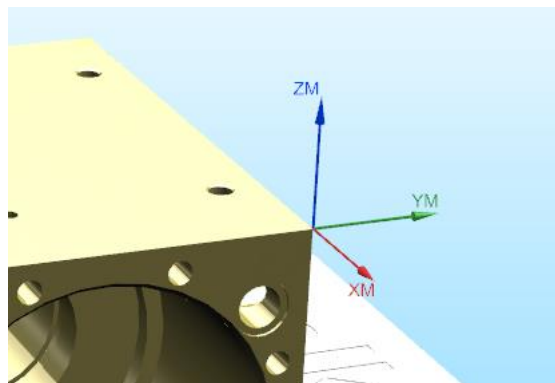
Obr. 60 Nastavení kinematiky stroje.

## 5.4 První upnutí

Z pohledu programování i kontroly na stroji (aktuální hodnoty souřadnic jednotlivých os stroje) při volbě a nastavení nulového bodu obrobku (MCS) je vhodné se držet způsobu kótování ve výkresové dokumentaci.



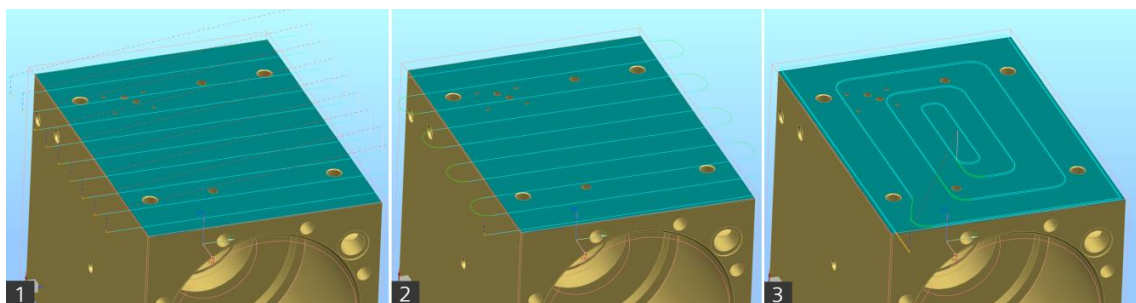
Obr. 61 První upínací poloha.



Obr. 62 Poloha MCS.

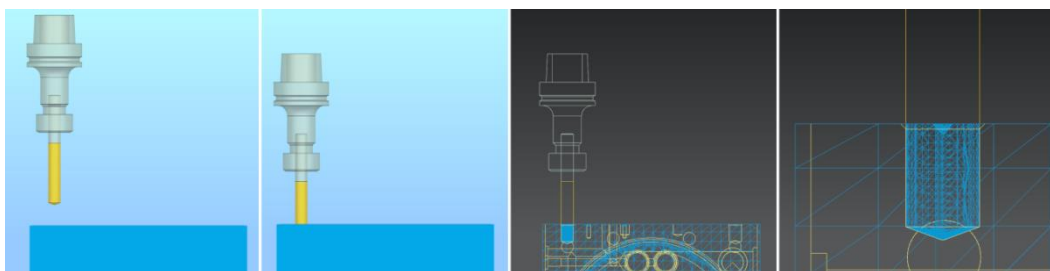
V tab. 29 je uveden sled úseků a jejich jednotkový strojní čas  $t_{AS}$ , vizualizace vybraných úseků na obr. 65 až obr. 68.

Na obr. 63 je zobrazen efekt optimalizace drah nástroje při frézování. **(1)** znamená hlavní řezný pohyb ve směru osy Y – do pevné čelisti svěráku, vždy s přejezdem rychloposuvem na počáteční pozici, sousledné frézování (čas obrábění: 2 min 11 s). **(2)** dráhy se zaoblením rohů 40 % D, střídavý směr hlavního řezného pohybu v ose Y i charakter řezu (sousledný – nesousledný), čas obrábění: 1 min 48 s. **(3)** Čas obrábění: 1 min 16 s.



Obr. 63 Nastavení drah nástroje při frézování: 1) nastavení „ZIG“, 2) nastavení „ZIG-ZAG“, 3) nastavení „FOLLOW PART“.

Pro ověření generované hloubky vrtání je výhodné využít drátového modelu.

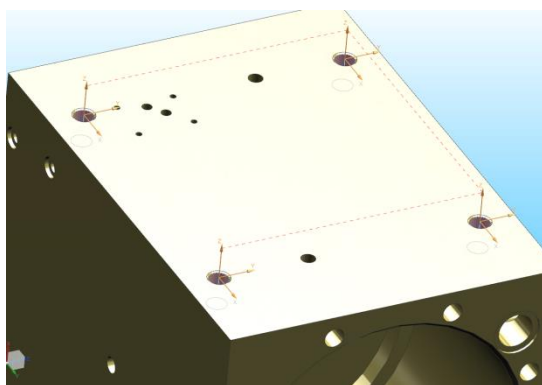


Obr. 64 Ověření hloubky vrtání.

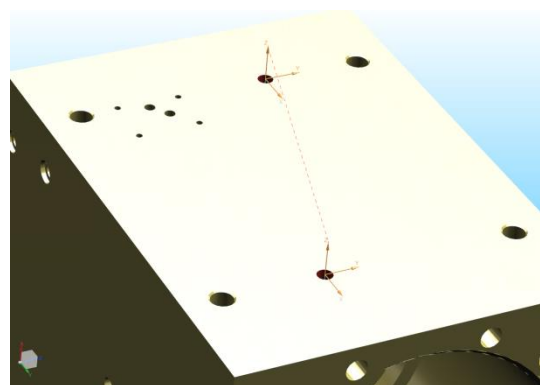
Tab. 29 Pracovní postup programu v prvním upnutí.

| Úsek č.                     | Úsek            | L     | $v_f$                   | $t_{AS}$ |
|-----------------------------|-----------------|-------|-------------------------|----------|
|                             |                 | [mm]  | [mm.min <sup>-1</sup> ] | [min]    |
| 1                           | HRUB_CELA       | 5 748 | 1 819                   | 3,05     |
| 2                           | SLICHT_CELA     | 1917  | 2 000                   | 0,95     |
| 3                           | NAVRTANI        | 1 262 | 300                     | 0,48     |
| 4                           | VRTANI_POD_M16  | 948   | 222                     | 0,53     |
| 5                           | VRTANI_POD_M5   | 414   | 591                     | 0,15     |
| 6                           | VRTANI_POD_10H7 | 354   | 234                     | 0,17     |
| 7                           | SRAZENI_PRO_M16 | 1 000 | 300                     | 0,88     |
| 8                           | SRAZENI_D10H7   | 306   | 300                     | 0,08     |
| 9                           | STRUZENI_10H7   | 347   | 318                     | 0,12     |
| 10                          | VRTANI_D7       | 262   | 443                     | 0,20     |
| 11                          | REZANI_M16      | 908   | 318                     | 0,40     |
| Celkem s výměnami nástrojů: |                 |       |                         | 9,02     |

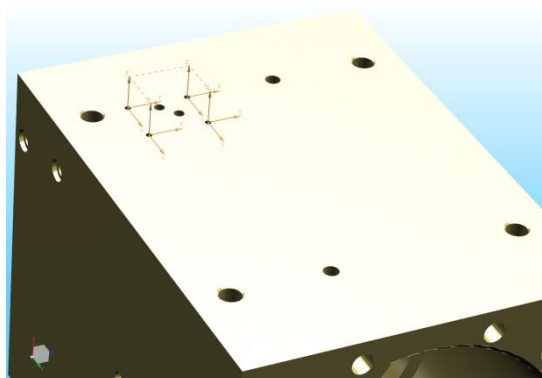
$L$  – délka dráhy nástroje včetně přejezdů;  $v_f$  – rychlost posuvu;  $t_{AS}$  – jednotkový čas strojní.



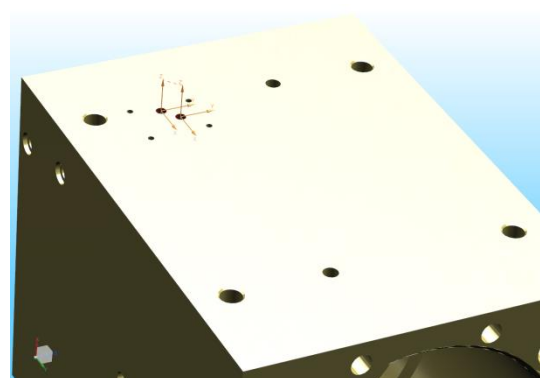
Obr. 65 Vrtání pro M16.



Obr. 66 Vrtání pro 10H7.



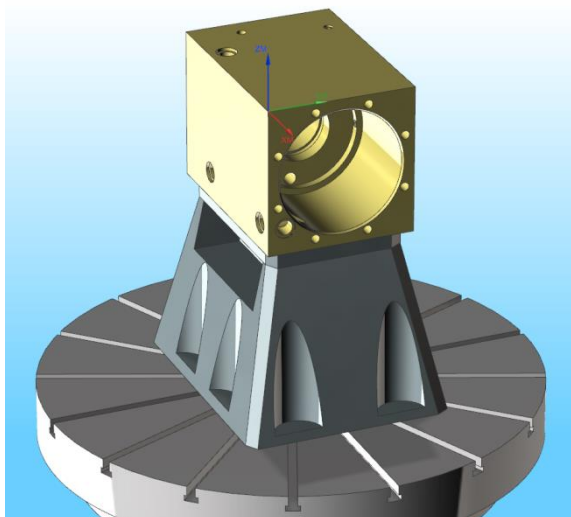
Obr. 67 Vrtání pro M5.



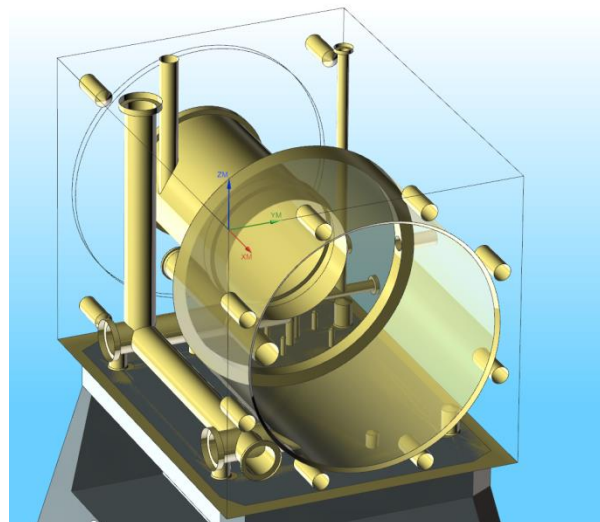
Obr. 68 Vrtání D7.

### 5.5 Druhé upnutí

Pro hrubování vnějšího tvaru byly použity optimalizované dráhy nástroje (obr. 73). Shrnutí úseků opracování je uvedeno v tab. 30.



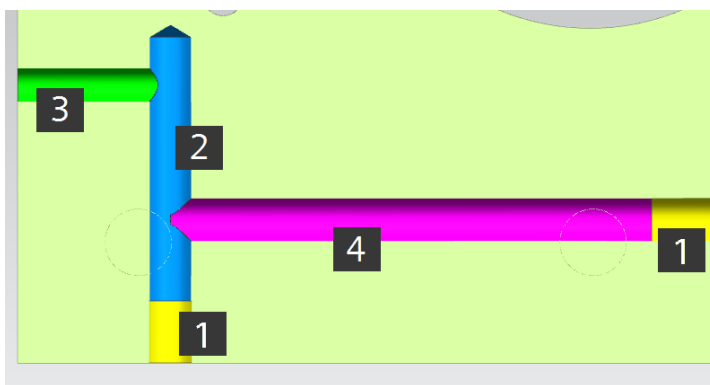
Obr. 69 Druhá upínací poloha.



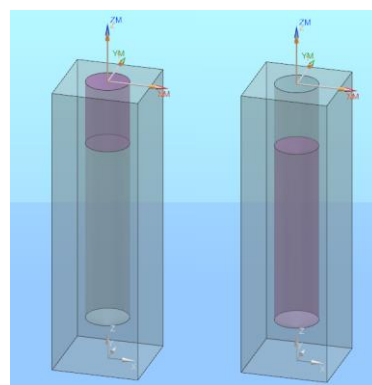
Obr. 70 Zobrazení propojovacích otvorů.

Pozornost ve druhém upnutí (obr. 69) je třeba věnovat hlubokým otvorům a otvorům, které se kříží (obr. 70). Zde je třeba optimalizovat dráhy nástroje použitím cyklu přerušovaného vrtání a generování jednotlivých drah s úpravou posuvů nástroje. V případě hlubokého vrtání (hloubka  $6 \times D$  nástroje a více, obr. 72) je třeba počítat s nasazením krátkého vrtáku pro tzv. pilotní otvor a dlouhého vrtáku s vnitřním chlazením s nájezdem do pilotního otvoru sníženými otáčkami a následným spuštěním standardního vrtacího cyklu.

U otvorů, které se kříží, je nutné zvolit správné pořadí pro jejich vyvrtání. Na (obr. 71) je principiálně znázorněna posloupnost vrtání. Nejdříve je vyvrtán pilotní otvor (1) pro hluboké díry. Následně musí být vyvrtán otvor (2) a nakonec (3) a (4) – pořadí těchto již volitelně. Nevhodné pořadí vrtání otvorů vede ke snížení životnosti nástroje.



Obr. 71 Překřížené otvory: 1) pilotní otvor, 2) hluboký otvor s vyšší prioritou, než otvory 3) a 4).



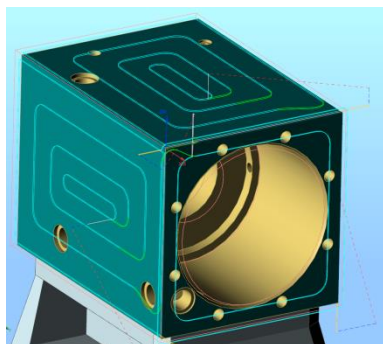
Obr. 72 Hluboké vrtání.



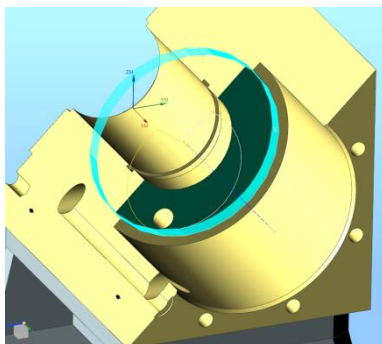
Tab. 30 Pracovní postup programu v prvním upnutí.

| Úsek č.                     | Úsek              | L<br>[mm] | $v_f$<br>[mm.min <sup>-1</sup> ] | $t_{AS}$<br>[min] |
|-----------------------------|-------------------|-----------|----------------------------------|-------------------|
| 1                           | HRUB_TVARU        | 38 064    | 1 819                            | 22,83             |
| 2                           | SLICHT_TVARU      | 10 852    | 2 000                            | 6,98              |
| 3                           | HRUB_D210         | 10 669    | 1819                             | 6,14              |
| 4                           | SLICHT_D210       | 2 747     | 168                              | 15,25             |
| 5                           | NAVRTANI          | 6 389     | 300                              | 2,10              |
| 6                           | VRTANI_POD_M16    | 4 117     | 222                              | 3,47              |
| 7                           | VRTANI_D15_PILOT  | 182       | 166                              | 0,53              |
| 8                           | DOVRTANI_D15      | 382       | 166                              | 1,12              |
| 9                           | VRTANÍ D11        | 316       | 210                              | 0,45              |
| 10                          | VRTANI_G1/8_PILOT | 1 805     | 276                              | 0,81              |
| 11                          | DOVRTANI_G1/8     | 2 244     | 276                              | 3,52              |
| 12                          | FREZOVANI_D15     | 1 183     | 413                              | 1,23              |
| 13                          | SRAZENI_PRO_M16   | 4 725     | 300                              | 3,12              |
| 14                          | REZANI_M16        | 4 652     | -                                | 2,78              |
| 15                          | REZANI_G1/8       | 1 213     | -                                | 0,74              |
| 16                          | FREZOVANI_D180    | 5 812     | 1 152                            | 7,15              |
| 17                          | HRUB_D200         | 655       | 23                               | 6,87              |
| 18                          | SLICHT_D200       | 655       | 47                               | 3,89              |
| 19                          | FREZOVANI_D108    | 925       | 852                              | 4,91              |
| 20                          | HRUB_D100         | 586       | 48                               | 4,53              |
| 21                          | SLICHT_D100       | 586       | 96                               | 2,25              |
| 22                          | ZAPICH_D106       | 2 367     | 452                              | 4,12              |
| 23                          | PILOT_POD_G3/4    | 1 812     | 101                              | 2,54              |
| 24                          | DOVRTANI_POD_G3/4 | 2 694     | 101                              | 4,33              |
| 25                          | REZANI_G3/4       | 1 798     | -                                | 2,86              |
| 26                          | VRTANI_D28        | 383       | 89                               | 0,68              |
| 27                          | VRTANI_D24        | 468       | 89                               | 0,57              |
| 28                          | VRTANI_POD_D22H8  | 920       | 93                               | 2,57              |
| 29                          | VRTANI_D20        | 790       | 88                               | 1,06              |
| 30                          | VYSTR_D22H8       | 721       | 104                              | 3,29              |
| Celkem s výměnami nástrojů: |                   |           |                                  | 122,69            |

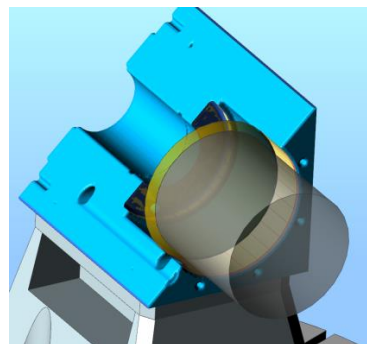
$L$  – délka dráhy nástroje včetně přejezdů;  $v_f$  – rychlost posuvu;  $t_{AS}$  – jednotkový čas strojní.



Obr. 73 Hrubování tvaru.



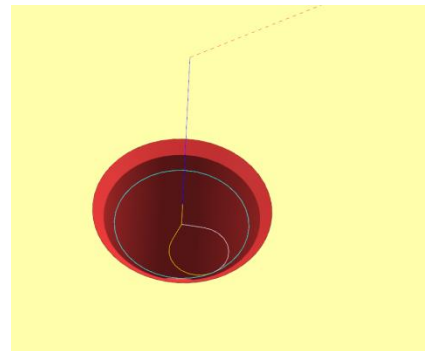
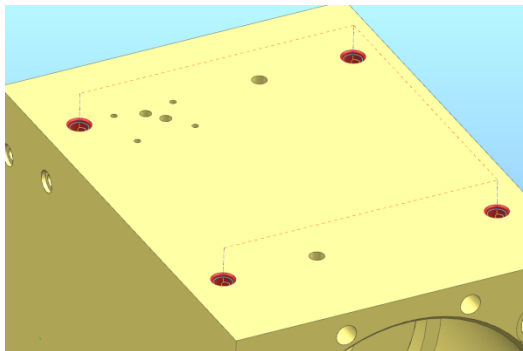
Obr. 74 Frézování dna Ø 180.



Obr. 75 Vyvrťování Ø 200.

## 5.6 Ukázka NC kódu

```
; SRAZENI DER PRO M16 OKRUZNIM FREZOVANIM
GROUP_BEGIN(0,"007_SRAZENI_PRO_M16",0,0)
;=====
N3040 MSG("SRAZENI_PRO_M16 | 220_D16_L50L190_MM")
N3050 M1
N3060 SETMS(1)
N3070 DIAMOF
N3080 T="220_D16_L50L190_MM"
N3090 M6
N3120 R3=300. ;ENGAGE
N3130 R4=233.88 ;FIRSTCUT
N3140 R5=300. ;CUT
N3150 R11=233.88 ;LASTCUT
N3160 R6=233.88 ;STEPOVER
N3170 R12=300. ;CROSSOVER
N3180 R8=300. ;RETRACT
N3200 CYCLE832(0.12,_ORI_FINISH,0.8)
;=====
N3210 LZ
N3220 G17
N3230 CYCLE800(0,"TC1",200000,27,0,0,0,0,-0.,0.,0,0,0,1,100,1)
N3240 G0 X-100. Y-95. S3000 D1 M3 M8
N3250 G0 Z143.
N3260 G0 Z121.
N3270 G1 Z118. F=R3
N3280 G1 X-98.8 Y-96.6
N3290 G3 X-96.6667 Y-97.6667 CR=2.6667
N3300 G3 X-94. Y-95. CR=2.6667
N3310 G3 X-100. Y-89. CR=6. F=R5
N3320 G3 X-106. Y-95. CR=6.
N3330 G3 X-100. Y-101. CR=6.
N3340 G3 X-94. Y-95. CR=6.
N3350 G3 X-96.6667 Y-92.3333 CR=2.6667 F=R8
N3360 G3 X-98.8 Y-93.4 CR=2.6667
N3370 G1 X-100. Y-95.
N3380 G1 Z121.
N3390 G0 Z143.
N3850 CYCLE832()
N3860 CYCLE800()
N3870 LZ
GROUP_END(0,0)
```



Obr. 76 Sražení děr se závitem M16 – dráhy nástroje.

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ NAVRŽENÉ TECHNOLOGIE

Upnutí součásti v první a druhé upínací poloze je znázorněno na obr. 77 a obr. 78. Výroba prvního, tzv. najížděcího kusu, trvala celkem 25 hodin. V simulaci na stroji bylo zapotřebí ověřit spolehlivost postprocesoru a simulace NX10 (vygenerované dráhy nástroje a bezkolizní stav), ujasnit způsob upínání, polohu a nastavení nulového bodu obrobku a především odladit NC program. Během výroby prvního kusu bylo zaznamenáno následující:

- ze simulace bylo zjištěno nekorektní generování drah u úseků srážení děr (délková korekce D1 měla vazbu na řídicí bod mimo špičku nástroje),
- vypočtený řezný výkon při frézování rovinných ploch odpovídal ukazateli výkonu na vřetení,
- nepříjemná kvalita povrchu rovinných ploch při frézování na čisto. Podařilo se vyřešit snížením posuvové rychlosti o 25 % (obr. 79),
- bezproblémové obrábění vnitřních průměrů vyvrtávacími nástroji (obr. 81, obr. 82, obr. 83),
- nepříjemná kvalita povrchu zápichu Ø 106 mm (obr. 80) způsobená obtížnými podmínkami obrábění (vyložení nástroje). Bez experimentálního ověření lze toto jen obtížně předvídat. Řešením bylo snížení otáček frézy o 25 %,
- nepříjemná životnost některých monolitních vrtáků (vylomení břitu), způsobená charakterem řezu (křížené otvory). U těchto problémových úseků bylo třeba upravit dráhu nástroje snížením rychlosti posuvu o 15 % při výjezdu ze záběru (tj. při nájezdu do překříženého otvoru) a opětovném nájezdu do záběru,
- u vystružování Ø 22H8 mm se vyskytl problém rychlého opotřebení nástroje. To se podařilo vyřešit snížením posuvu při výjezdu nástroje z otvoru,
- u některých vrtacích úseků byla pozorována špatná tvorba třísky. Řešením bylo zvýšení rychlosti posuvu,
- některé úseky bylo třeba ošetřit programovým zastavením M0 pro odstranění třísek (přesevším úseky vyvrtávání).

Při realizaci experimentu byly zaznamenávány úkony obsluhy pro stanovení výsledného času operace. Strojní čas se u pátého kusu ustálil na hodnotě 380 min. Tato hodnota neodpovídá výstupu ze simulace NX10 (131,7 min) z důvodů:

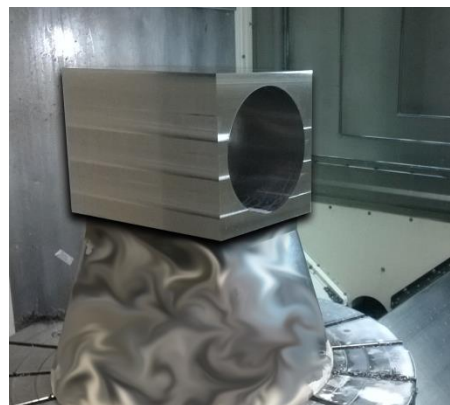
- čas obrábění v NX10 uvádí pouze čistý čas nástroje v řezu,
- nejsou zde započteny časy výměny nástroje a bezpečnostní odjezdy pro naklápění nástroje,
- NX10 nerespektuje velikost rychloposuvu pro přejezdy 60 000 mm.min<sup>-1</sup>,
- do času se promítá také odstraňování třísek, mazání závitníků, kontrola a měření rozměrů, úprava korekcí nástrojů apod.,

Výše uvedené rozdíly mezi výstupem simulace a skutečnými časy lze kompenzovat nastavením postprocesoru a takto ošetřený výsledný čas uvést v hlavičce programu.





Obr. 77 Upnutí v první poloze.



Obr. 78 Upnutí ve druhé poloze.



Obr. 79 Obrobená plocha.



Obr. 80 Povrch Ø 106 mm.



Obr. 81 Hrubování Ø 200 mm.



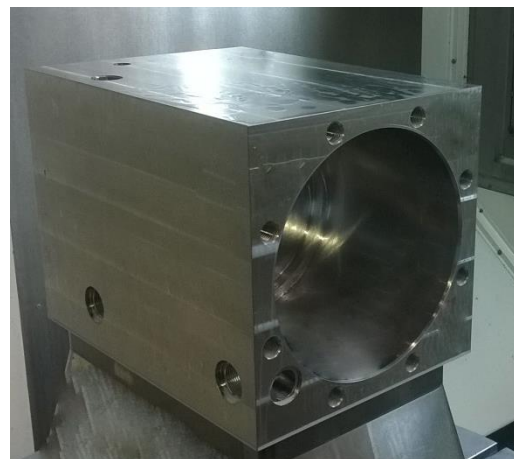
Obr. 82 Obrábění vnitřního tvaru.



Obr. 83 Obrobený vnitřní tvar.



Obr. 84 Stav po prvním upnutí.



Obr. 85 Hotová součást.

## 7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ POSOUZENÍ

Zásadní význam má operace č. 20 – obrábění na stroji DMU. Operace kontroly, skladu a zámečnické dílny jsou zahrnuty v režijních nákladech. Celková cena výrobku je dána vztahem (7.2), přičemž:

- cena polotovaru je 30 650 Kč,
- čas přípravy jednoho nástroje je 3 min ( $32 \times 3 = 96$  min),
- přípravný čas pro jedno upnutí je 35 min ( $2 \times 35 = 70$  min),
- celkový strojní čas zjištěný experimentálně je 380 min,
- náklady na přípravek (73 000 Kč) vztažené na jeden výrobek z roční výrobní série 100 ks činí 730 Kč/ks,
- náklady na pořízení nástrojů (202 100 Kč) vztažené na jeden výrobek z roční výrobní série 100 činí 2 021 Kč/ks.

Výsledný strojní (380 min) i přípravný čas ( $96 + 70 = 166$  min) byly navýšeny o časovou rezervu. Ve výpočtu ceny součásti je tak zahrnut jednotkový strojní čas  $t_{AS} = 400$  min a přípravný čas  $t_B = 180$  min. Náklady spojené s výrobou přípravku i pořízením nástrojů a dalšího vybavení jsou zahrnuty v režijních nákladech.

Původní technologie obrábění byla realizována na horizontální frézce ve 4 ustaveních s celkovou dotací 28 hod. Polotovarem byl výkovek  $246 \times 246 \times 342$  mm s předvrtanou dírou  $\varnothing 94$  mm (varianta 5). Při hodinové sazbě 1 180 Kč a režii 360 % byly náklady na výrobu součásti 181 844 Kč. Kromě vyšší pracnosti (4 upínací polohy, hrubování  $\varnothing 200$  mm) je efekt nové technologie patrný z porovnání celkových nákladů obou technologií.

Náklady na hodinu provozu stroje  $N_{hs}$  [14]: (7.1)

$$N_{hs} = N_{hsf} + \frac{C_s + N_i + N_d - L_h}{Z \cdot F_{ef}} [Kč]$$

$$N_{hs} = 717 + \frac{15 \cdot 10^6 + 2,5 \cdot 10^4 + 2,5 \cdot 10^4 - 1,8 \cdot 10^5}{7 \cdot 1\,875} = 1\,850 \text{ Kč}$$

|      |           |                         |                                 |
|------|-----------|-------------------------|---------------------------------|
| kde: | $N_{hsf}$ | [Kč.hod <sup>-1</sup> ] | fixní náklady na hodinu stroje, |
|      | $C_s$     | [Kč]                    | cena stroje,                    |
|      | $N_i$     | [Kč]                    | náklady na instalaci stroje,    |
|      | $N_d$     | [Kč]                    | náklady na demontáž stroje,     |
|      | $L_h$     | [Kč]                    | likvidační hodnota,             |
|      | $Z$       | [r]                     | životnost stroje,               |
|      | $F_{ef}$  | [hod]                   | roční efektivní fond stroje.    |

Celková cena součásti  $N_c$  navržené technologie [14]: (7.2)

$$N_c = N_p + \left[ \left( \sum t_{AS} + t_B \right) \cdot \frac{N_{hs}}{60} \right] \cdot \left( 1 + \frac{R}{100} \right) [Kč]$$

$$N_c = 30\,650 + \left[ (400 + 180) \cdot \frac{1\,850}{60} \right] \cdot \left( 1 + \frac{540}{100} \right) = 145\,104 \text{ Kč}$$

|      |          |       |                                   |
|------|----------|-------|-----------------------------------|
| kde: | $N_p$    | [Kč]  | náklady na polotovar,             |
|      | $t_{AS}$ | [min] | jednotkový strojní čas,           |
|      | $N_{hs}$ | [Kč]  | náklady na hodinu provozu stroje, |
|      | $t_B$    | [min] | přípravný čas,                    |
|      | $R$      | [%]   | režie.                            |

## DISKUZE

Velká část zvolených řezných podmínek byla z funkčního pohledu zvolena správně (dodrženy požadavky na přesnost i kvalitu povrchu). Ačkoliv existuje prostor pro další optimalizaci obráběcího procesu za účelem zvýšení produktivity, z časových důvodů to dosud nebylo možné.

Komplikace (špatná tvorba třísky, chvění, špatná kvalita obrobeného povrchu, trvanlivost nástrojů, apod.), které nastaly v průběhu experimentální části, se podařilo vyřešit úpravou řezných podmínek, případně drah nástroje.

Z okrajového porovnání navržené technologie se zavedenou technologií lze výsledek hodnotit kladně. Došlo ke snížení pracnosti i výsledné ceny výrobku. Zde se velmi pozitivně projevila vysoká úroveň vybavení i softwarové podpory.

Početní metody obsažené v této práci, byly užitečné pro volbu nejvýhodnější varianty polotovaru. Bylo prokázáno, že varianty, opírající se o možnosti soustružení, není z technických důvodů možné realizovat (soustružení malých průměrů znamená mezní hodnotu otáček stolu).

Na základě průběhu experimentální části by bylo pro další postup a zvýšení efektivity procesu výhledově možné uvažovat:

- úpravu nastavení postprocesoru pro dosažení odpovídajících obráběcích časů při výstupů z NX10,
- zvýšení produktivity nástrojů optimalizací řezných podmínek (byly zvoleny parametry na spodní hranici doporučení výrobce),
- zpřesnění normy spotřeby času,
- náhradu závitníku M16 závitovou frézou z důvodu jeho praktiky nedefinovatelné životnosti (redukce pravděpodobnosti zalomení závitníku a s tím spojenými problémy),
- vzhledem k dosahované rozměrové přesnosti dodávaných polotovarů snížení přídavek pro obrábění z 3 mm na plochu na 1 mm na plochu. Tato úprava vede k možnému zvýšení výkonnosti obrábění, případně k delší trvanlivosti nástroje,
- optimalizaci obráběcího procesu frézování rovinných ploch – použití procesní kapaliny nebo frézování nasucho apod.,
- automatizaci ustavení obrobku, zařazení měřicích cyklů pro kontrolu rozměrů – redukce počtu operací (eliminace operace měření na 3D přístroji),
- rozšíření kapacity zásobníku nástrojů pro redukci přípravných času (nástroje trvale v zásobníku bez dalšího seřizování),
- v případě větší roční výrobní série nákup stroje se dvěma pracovními paletami (každá pro jedno ustavení součásti).

## ZÁVĚR

Nasazením moderního obráběcího centra, produktivních nástrojů a využitím pokročilého CAM systému NX10, se podařilo úspěšně aplikovat a realizovat navržené řešení výroby hydraulického válce. Byl dodržen požadavek na výrobu dílce na jednom pracovišti, což se příznivě projevilo na nízkém stupni pracnosti a přijatelné ekonomice výrobního procesu za současného dosažení bezvadné kvality výrobku. Efekt navržené technologie byl pro názornost okrajově demonstrován na porovnání se zavedenou technologií.

Během přípravy výroby a praktického experimentu nebyly zaznamenány technicky neřešitelné situace. Některé komplikace, spojené s prvovýrobou, byly řešitelné úpravou řezných podmínek, případně drah nástroje bez dalších významných zásahů. Tato skutečnost vedla k velmi rychlému zavedení nové technologie do praxe.

V části práce byly provedeny výpočty řezných výkonů hrubovacích nástrojů. Experimentální část potvrdila správnost těchto výpočtů a také prvotní předpoklad, že uvedený stroj není vhodný pro těžké hrubovací operace. Tímto byla definitivně opodstatněna volba polotovaru s konkrétními úpravami od dodavatele namísto zařazení vlastních hrubovacích operací.

Na základě teoretických poznatků, praktických zkušeností a experimentální části, lze výsledky z nasazení nové technologie shrnout do následujících bodů:

- bylo prokázáno, že nejvýhodnější variantou polotovaru z hlediska možností vybavení, pracnosti i výrobních nákladů je dodavatelem předhrubovaný výkovek čtvercového průřezu,
- přes některé výhody soustružení vnitřního tvaru nebylo z technického hlediska možné tuto obráběcí metodu zařadit, a to především z důvodů tvorby a odvodu třísek z místa řezu a vyšší pracnosti,
- byla potvrzena správnost výsledku výpočtu řezného výkonu při hrubování čelní frézou, čímž se spolehlivě popřela možnost použití stroje pro těžké produktivní obrábění,
- z uvažovaných, potenciálně přijatelných výrobních postupů, byla zvolena varianta nejnižší pracnosti (jedno pracoviště, dvě ustavení součásti),
- zařazením přípravy nástrojů mimo stroj bylo dosaženo minimálních přípravných časů, spojených se seřízením nástrojů,
- z hlediska celkové pracnosti a nákladů na výrobu součásti lze zbylé operace technologického postupu zahrnout do režijních nákladů,
- byly splněny požadavky na rozměrovou přesnost a kvalitu opracování,
- existuje prostor pro další optimalizaci výrobního procesu možným rozšířením vybavení stroje (kapacity nástrojového zásobníku), úpravou řezných parametrů pro zvýšení produktivity nástrojů, úpravou přídavků polotovaru, eliminace některých operací, apod.,
- podařilo se docílit snížení výrobních nákladů v porovnání se zavedenou technologií o 20 %.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. BEČVÁŘ, J. *Tepelné turbíny*. Praha: SNTL, 1968, 544 s.
2. SIEMENS INDUSTRIAL TURBOMACHINERY s.r.o. *Historie a současnost. Parní turbíny v Brně*. Vyd. 3. Brno, 2010. ISBN 978-80-902681-3-5.
3. KADRNOŽKA, J. *Lopatkové stroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204297-1.
4. ŠKOPEK, J. *Tepelné turbíny a turbokompresory*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-862-6.
5. ABB ENS. *Parní a plynové turbíny. Konstrukce a technologie*. Brno. 1998.
6. ZEMČÍK, O. *Technologická příprava výroby*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.
7. ČSN 41 5320
8. FOREJT, M., PÍŠKA M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
9. SANDVIK COROMANT. *ISO P Oceli* [online]. [vid. 2017-02-10]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece\\_materials/iso\\_p\\_steel/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_p_steel/pages/default.aspx)
10. DMG MORI. *DMU/DMC duoBLOCK® serie* [online]. [vid. 2017-02-10]. Dostupné z: [http://media.dmgmori.com/media/epaper/dmu\\_dmc\\_duoblock\\_uk/epaper/dmu\\_dmc\\_duoblock.pdf](http://media.dmgmori.com/media/epaper/dmu_dmc_duoblock_uk/epaper/dmu_dmc_duoblock.pdf)
11. ZEMČÍK, O. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 193 s. ISBN 80-2147-2336-6.
12. LEINVEBER, J., VÁVRA. P. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006. ISBN 80-736-1033-7.
13. SANDVIK COROMANT. *CoroKey 2010* [online]. [vid. 2017-02-10]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/corokey\\_2010.pdf](http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/cs-cz/corokey_2010.pdf)
14. ŠTULPA, M. *CNC obráběcí stroje a jejich programování*. Praha. BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-207-8.
15. ZEMČÍK, O. *Technologické procesy – část obrábění. Učební texty kombinovaného bakalářského studia* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství [vid. 2017-02-10], Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TechnProcesy.pdf>
16. HUMÁR, A. *Technologie I. Technologie obrábění – 1. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003 [vid. 2017-02-10], 138 s. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)
17. HUMÁR, A. *Technologie I. Technologie obrábění – 2. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004 [vid. 2017-02-10], 138 s. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-2cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf)

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Zkratka      | Popis  |
|--------------|--|
| <b>2D</b>    | Dvoudimenzionální, dvourozměrný                |
| <b>3D</b>    | Trojdimenzionální, trojrozměrný                |
| <b>CAD</b>   | Computer Aided Design                          |
| <b>CAM</b>   | Computer Aided Manufacturing                   |
| <b>CNC</b>   | Computer Numerical Control                     |
| <b>ČSN</b>   | Česká státní norma                             |
| <b>EN</b>    | Evropská norma                                 |
| <b>ISO</b>   | International Organization for Standardization |
| <b>ISO P</b> | Skupina obráběných materiálů - ocel            |
| <b>IT</b>    | Toleranční stupeň (stupeň přesnosti)           |
| <b>MCS</b>   | Machine Coordinate System                      |
| <b>NC</b>    | Numerical Control                              |
| <b>NT</b>    | Nízkotlaký                                     |
| <b>SK</b>    | Slinutý karbid                                 |
| <b>SW</b>    | Software                                       |
| <b>VBD</b>   | Vyměnitelná břitová destička                   |
| <b>VT</b>    | Vysokotlaký                                    |
| <b>VUT</b>   | Vysoké učení technické                         |
| <b>W.Nr.</b> | Werkstoffnummer, číslo materiálu               |

| Symbol                  | Jednotka                | Popis   |
|-------------------------|-------------------------|---|
| <b>A<sub>D</sub></b>    | [mm <sup>2</sup> ]      | Průřez třísky                                     |
| <b>C<sub>N</sub></b>    | [Kč]                    | Cena nástroje                                     |
| <b>C<sub>s</sub></b>    | [Kč]                    | Cena stroje                                       |
| <b>D</b>                | [mm]                    | Označení průměru                                  |
| <b>E</b>                | [GPa]                   | Modul pružnosti v tahu                            |
| <b>F<sub>c</sub></b>    | [N]                     | Řezná síla  |
| <b>F<sub>ef</sub></b>   | [hod]                   | Roční efektivní fond stroje                       |
| <b>F<sub>u</sub></b>    | [N]                     | Upínací síla                                      |
| <b>L</b>                | [mm]                    | Délka   |
| <b>L<sub>h</sub></b>    | [Kč]                    | Likvidační hodnota                                |
| <b>L<sub>n</sub></b>    | [mm]                    | Délka nájezdu                                     |
| <b>L<sub>p</sub></b>    | [mm]                    | Délka přejezdu                                    |
| <b>L<sub>prac</sub></b> | [mm]                    | Pracovní délka                                    |
| <b>M<sub>c</sub></b>    | [Nm]                    | Krouticí moment                                   |
| <b>M<sub>cs</sub></b>   | [Nm]                    | Dostupný krouticí moment stroje                   |
| <b>N<sub>A</sub></b>    | [Kč]                    | Náklady na polotovár                              |
| <b>N<sub>B</sub></b>    | [Kč]                    | Hodinová sazba stroje                             |
| <b>N<sub>C</sub></b>    | [Kč.hod <sup>-1</sup> ] | Náklady na strojní čas opracování vnitřního tvaru |
| <b>N<sub>D</sub></b>    | [Kč]                    | Náklady na nástroje                               |
| <b>N<sub>d</sub></b>    | [Kč]                    | Náklady na demontáž stroje                        |
| <b>N<sub>E</sub></b>    | [Kč]                    | Náklady na upínání                                |
| <b>N<sub>F</sub></b>    | [Kč]                    | Náklady na seřízení nástrojů                      |
| <b>N<sub>hps</sub></b>  | [Kč.hod <sup>-1</sup> ] | Náklady na hodinu provozu stroje                  |
| <b>N<sub>hsf</sub></b>  | [Kč.hod <sup>-1</sup> ] | Fixní náklady na hodinu stroje                    |



|            |                                       |  |
|------------|---------------------------------------|--|
| $N_i$      | [Kč]                                  | Náklady na instalaci stroje                  |
| $N_p$      | [Kč]                                  | Náklady na polotovar                         |
| $N_{ph}$   | [Kč]                                  | Náklady na polotovar včetně opracování       |
| $P_c$      | [kW]                                  | Řezný výkon                                  |
| $P_{cs}$   | [kW]                                  | Dostupný výkon stroje                        |
| $P_N$      | [-]                                   | Počet nástrojů                               |
| $P_U$      | [-]                                   | Počet upnutí                                 |
| $Q$        | [cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ] | Výkonnost obrábění                           |
| $Q_f$      | [cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ] | Výkonnost frézování                          |
| $Q_s$      | [cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ] | Výkonnost soustružení                        |
| $Q_v$      | [cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ] | Výkonnost vrtání                             |
| $R$        | [%]                                   | Režie  |
| $R_a$      | [μm]                                  | Střední aritmetická úchylka profilu          |
| $R_e$      | [MPa]                                 | Mez kluzu                                    |
| $R_m$      | [MPa]                                 | Mez pevnosti v tahu                          |
| $R_{p0,2}$ | [MPa]                                 | Mez kluzu                                    |
| $S$        | [mm <sup>2</sup> ]                    | Střižný průřez                               |
| $T$        | [-]                                   | Označení nástroje                            |
| $V_{0NX}$  | [m <sup>3</sup> ]                     | Objem součásti dle NX10                      |
| $VKM$      | [%]                                   | Využití krouticího momentu                   |
| $V_{pf}$   | [m <sup>3</sup> ]                     | Objem součásti pro frézovací operace         |
| $V_{ps}$   | [m <sup>3</sup> ]                     | Objem součásti pro soustružnické operace     |
| $V_{pv}$   | [m <sup>3</sup> ]                     | Objem součásti pro vrtací operace            |
| $VV$       | [%]                                   | Využití výkonu                               |
| $Z$        | [r]                                   | Životnost stroje                             |
| $a_e$      | [mm]                                  | Šířka frézované plochy                       |
| $a_p$      | [mm]                                  | Šířka záběru ostří                           |
| $b_D$      | [mm]                                  | Šířka třísky                                 |
| $d$        | [mm]                                  | Označení průměru                             |
| $d_0$      | [mm]                                  | Průměr obráběné součásti                     |
| $d_3$      | [mm]                                  | Malý průměr závitu                           |
| $d_T$      | [mm]                                  | Průměr nástroje                              |
| $f$        | [mm]                                  | Posuv na otáčku                              |
| $f_n$      | [mm]                                  | Posuv na otáčku                              |
| $f_t$      | [-]                                   | Součinitel smykového tření                   |
| $f_z$      | [mm]                                  | Posuv na zub                                 |
| $h$        | [mm]                                  | Hloubka frézování                            |
| $h_D$      | [mm]                                  | Tloušťka třísky                              |
| $k_b$      | [-]                                   | Koeficient bezpečnosti pro hrubovací operace |
| $k_c$      | [MPa]                                 | Měrná řezná síla                             |
| $k_{c1}$   | [MPa]                                 | Měrná řezná síla konkrétního materiálu       |
| $l$        | [mm]                                  | Délka dráhy nástroje                         |
| $m_{0NX}$  | [kg]                                  | Hmotnost součásti dle NX10                   |
| $m_c$      | [-]                                   | Exponent závislý na vlastnostech materiálu   |
| $n$        | [min <sup>-1</sup> ]                  | Otáčky                                       |



|             |                         |                                   |
|-------------|-------------------------|-----------------------------------|
| $n_s$       | [-]                     | Počet šroubů                      |
| $n_z$       | [-]                     | Počet zubů v záběru               |
| $p$         | [Pa]                    | Tlak                              |
| $p_d$       | [-]                     | Počet drah nástroje               |
| $p_{ss}$    | [-]                     | Počet stoupání spirály            |
| $s_s$       | [mm]                    | Stoupání spirály                  |
| $t_{AS}$    | [min]                   | Jednotkový čas strojní            |
| $t_B$       | [min]                   | Přípravný čas                     |
| $t_{sof}$   | [min]                   | Strojní čas frézovací operace     |
| $t_{sof}$   | [min]                   | Strojní čas soustružnické operace |
| $t_{sov}$   | [min]                   | Strojní čas vrtací operace        |
| $u_{sm}$    | [%]                     | Ukazatel využití materiálu        |
| $v_c$       | [m.min <sup>-1</sup> ]  | Řezná rychlost                    |
| $v_f$       | [mm.min <sup>-1</sup> ] | Posuvová rychlost                 |
| $z$         | [-]                     | Počet zubů                        |
| $\kappa_r$  | [°]                     | Úhel nastavení hlavního ostří     |
| $\tau_{DS}$ | [MPa]                   | Dovolené namáhání ve střihu       |
| $\varphi$   | [°]                     | Úhel záběr frézy                  |